



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

**실시간 Cycle Slip 검출과 보상을 통한  
강건한 의사위성/초저가 IMU 결합 실  
내 항법 시스템**

**Pseudolite/Ultra Low-Cost IMU Integrated  
Robust Indoor Navigation System  
through Real-time Cycle Slip Detection and  
Compensation**

2017년 8월

**서울대학교 대학원**

**기계항공공학부**

**김 문 기**

## 초 록

GNSS를 통한 항법이 활성화 되면서 GNSS 항법이 불가능한 실내에서의 항법에 대한 필요성 역시 증가하고 있다. 하지만 실내 환경의 경우 항법을 수행함에 있어 방해가 되는 요소들이 많기 때문에 아직 확실하다고 할 수 있는 실내항법시스템은 개발되어 있지 않다. 이에 따라 원활한 실내 항법 시스템을 개발하기 위해 현재 RFID, Wi-Fi, Visual Sensor, IMU 그리고 의사위성 등 다양한 방식의 연구들이 진행되고 있다.

그 중 높은 정확도의 위치결과를 얻을 수 있는 의사위성 반송파 신호와 저가의 IMU 그리고 Magnetometer의 결합을 통해 실내 항법을 시도하였던 연구가 존재하였다. 하지만 이 경우 반송파의 사이클 슬립 발생 문제가 남아 있었기 때문에 항법에는 제한이 있었다. 또 다른 연구로는 실외에서 GPS와 IMU의 결합을 통해 사이클 슬립을 검출 및 보상한 연구가 있었다. 이는 실외환경에서 진행된 연구로써 1 사이클 단위의 슬립 만 검출 가능하였다. 그런데 실내환경에서는 사이클 슬립 발생률이 더 높아 하프 사이클 단위의 슬립까지도 자주 발생하기 때문에 실내항법에서는 이를 그대로 적용할 수 없었다.

본 연구에서는 위의 두 문제를 다음과 같은 방법으로 해결하였다. 먼저 의사위성과 초저가 IMU의 결합을 통해 사이클 슬립을 검출 및 보상해 줌으로써 의사위성 시스템에 남아있던

문제점인 사이클 슬립 발생 문제를 해결하고자 하였다. 또한 실내환경에서는 사이클 슬립의 발생률이 높기 때문에 하프 사이클 단위의 슬립 역시 자주 발생하게 되므로 사이클 슬립 검출 및 보상을 하프 사이클 단위까지 해줌으로써 이를 해결하고자 하였다.

최근 스마트 폰의 발달로 인해 스마트폰을 활용하여 수행할 수 있는 작업들의 기술적 수준과 활용범위가 모두 증가하고 있다. 이에 따라 궁극적으로는 스마트 폰 내에서 이 모든 작업이 수행되는 실내 항법을 개발하는 것이 목표이다. 그 과정의 일환으로 스마트 폰에 내장된 초저가 IMU를 의사위성/IMU 결합에 사용하였고 초저가 IMU를 사용하기 위한 센서 모델링을 수행하였으며 데이터에 존재하는 이상 문제 등을 처리하였다.

결과적으로 의사위성 단독 대비 의사위성/초저가 IMU 결합항법의 위치 정확도는 30%정도 향상되었으며 하프 사이클 슬립 검출에 있어서는 threshold를 0.5 half cycle 로 설정하였을 경우 false alarm과 miss detection의 발생 확률이  $10^{-8}$  수준이었다.

이 결과를 확인하기 위해 ‘KOBUKI’ 로봇과 스마트 폰을 이용하여 실시간 항법을 구현하였으며 실시간으로 하프 사이클 단위의 슬립들을 임의로 발생시키더라도 검출 및 보상되어 항법과 제어가 잘 유지되는 것을 확인하였다.

**주요어 :** 실내 항법, 의사위성, 초저가 IMU, 의사위성/IMU 결합, Extended Kalman Filter, 약결합, 하프 사이클 슬립 검출 및 보상,

Monitoring Value, 스마트 폰, 위치 정확도, 실시간 항법, 센서 모델링  
학 번 : 2015-22730

# 목 차

초 록 .....	i
목 차.....	iv
그림 목차 .....	vi
표 목차.....	ix
제 1 장 서 론 .....	1
제 1 절 연구 동기 및 목적 .....	1
제 2 절 연구 동향 .....	2
제 3 절 연구 내용 및 방법 .....	5
제 4 절 연구의 기여도 .....	6
제 2 장 Extended Kalman Filter를 통한 의사위성/초저가 IMU 결합     7	
제 1 절 의사위성 기반 실내항법시스템 .....	7
1. 오차 요소 .....	8
2. CDGPS .....	8
제 2 절 초저가 IMU .....	10
1. 가속도계 .....	10
2. 자이로스코프 .....	16
3. 센서 데이터 이상 현상 .....	21
제 3 절 전체 시스템 구성 .....	23
제 4 절 Extended Kalman Filter .....	24
1. State .....	25
2. Nonlinear Equation .....	25
3. State Equation .....	26
제 5 절 Sensor Bias Modeling 및 데이터 이상현상 해결 .....	27
1. 가속도계 Bias Modeling .....	28
2. 자이로스코프 Bias Modeling .....	29
3. 가속도계 데이터 이상 문제 해결 .....	29

4. 자이로스코프 데이터 이상 문제 해결.....	31
제 6 절 속도, 헤딩 Measurement.....	34
1. 속도 Measurement.....	34
2. 헤딩 Measurement.....	37
제 7 절 Process Noise and Measurement Noise .....	39
1. Process Noise .....	39
2. Measurement Noise .....	40
<b>제 3 장 하프 사이클 슬립 검출 및 보상.....</b>	<b>41</b>
제 1 절 의사위성 반송파를 이용한 실내항법에서의 하프 사이클 슬립 발생.....	41
제 2 절 사이클 슬립 검출 알고리즘.....	43
제 3 절 하프 사이클 슬립의 검출 확률 .....	46
제 4 절 Monitoring Value 잔여오차 분석.....	49
1. Carrier Phase 측정치에 발생하는 오차 .....	50
2. 결합항법으로 추정된 Distance 항에 포함되는 오차..	51
제 5 절 사이클 슬립 보상 알고리즘.....	60
<b>제 4 장 실시간 항법 구성 및 결과.....</b>	<b>62</b>
제 1 절 실시간 항법 구성.....	62
1. 전체 장비 구성 .....	62
2. 시리얼 통신 구성.....	63
3. 실시간 항법 프로그램.....	66
제 2 절 결과.....	68
1. 실시간 항법 결과.....	68
2. 하프 사이클 슬립 검출 및 보상 결과.....	70
<b>제 5 장 결론 .....</b>	<b>75</b>
<b>참고 문헌 .....</b>	<b>77</b>

## 그림 목차

Figure 2-1 실내에 설치된 의사위성 시스템 구성도 .....	7
Figure 2-2 Galaxy S7 좌표계 .....	10
Figure 2-3 가속도계 정적 데이터.....	11
Figure 2-4 가속도계 동적 데이터.....	12
Figure 2-5 가속도계 Scale Factor 실험.....	13
Figure 2-6 자이로스코프 정적 데이터 .....	16
Figure 2-7 자이로스코프 동적 데이터 .....	17
Figure 2-8 자이로스코프 Scale Factor 실험.....	18
Figure 2-9 가속도계 데이터에 나타난 이상현상.....	22
Figure 2-10 자이로스코프 데이터에 나타난 이상현상 .....	22
Figure 2-11 시스템 Block Diagram .....	23
Figure 2-12 Extended Kalman Filter .....	24
Figure 2-13 자세에 따라 수평 축에 측정되는 중력가속도 성분 .....	28
Figure 2-14 이상현상 해결 이전의 가속도계 데이터 .....	31
Figure 2-15 이상현상 해결 이후의 가속도계 데이터 .....	31
Figure 2-16 자이로스코프 이상 현상 그래프 중 최소값.....	33
Figure 2-17 자이로스코프 X축 동적 데이터.....	33
Figure 2-18 이상현상 제거 전의 자이로스코프 데이터.....	34
Figure 2-19 이상현상 제거 후의 자이로스코프 데이터.....	34
Figure 2-20 도플러를 이용하여 계산한 속도 데이터 .....	35
Figure 2-21 결합항법 속도 결과와 CDGPS 위치 결과를 이용한 속도 Measurement.....	36
Figure 2-22 결합항법 속도 결과와 CDGPS 결과를 이용한 속도 데이터.....	37
Figure 2-23 속도오차와 heading오차 사이의 관계 .....	38
Figure 3-1 Signal block이 없었지만 사이클 슬립이 발생한 사이클 슬립 Monitoring Value.....	42



Figure 3-2 하프 사이클 슬립이 발생한 $\nabla\Delta\nabla t\phi$ 그래프.....	42
Figure 3-3 하프 사이클 슬립에 의한 위치오차 .....	43
Figure 3-4 Distance 변화량 향이 존재하는 $\nabla\Delta\nabla t\phi$ 그래프 .....	44
Figure 3-5 결합항법을 통해 추정된 distance 변화량.....	45
Figure 3-6 Distance 향이 제거된 Monitoring Value .....	46
Figure 3-7 동적상황 실시간 Monitoring Value .....	47
Figure 3-8 Monitoring Value 잔여오차, $\pm 1$ half cycle 슬립에 대한 확률분포 .....	48
Figure 3-9 확률분포 0.5 half cycle 부분 확대 그래프.....	49
Figure 3-10 측정치 시간간격에 따른 위치오차 시뮬레이션. ....	52
Figure 3-11 기존 ‘KOBUKI’ 로봇의 Impulse 형태의 가속도 .....	53
Figure 3-12 움직임을 부드럽게 한 후의 가속도 데이터.....	54
Figure 3-13 Epoch간 사용자 위치 추정오차에 따른 Monitoring value 잔여오차.....	55
Figure 3-14 사용자 위치에 따른 시선벡터의 위성간 차분 ..	56
Figure 3-15 임의의 두 위성에 대한 위치에 따른 ${}^i\nabla^j{}_r\Delta_u\nabla_t\delta d$ .....	58
Figure 3-16 위성 배치와 사용자의 활동 반경.....	59
Figure 3-17 사이클 슬립 보상 전과 후 .....	61
Figure 4-1 실내 실험 환경 .....	62
Figure 4-2 시리얼 통신 구성.....	63
Figure 4-3 블루투스로 전송된 데이터의 시간간격 .....	64
Figure 4-4 유선으로 전송된 데이터의 시간간격.....	64
Figure 4-5 RF모뎀으로 전송된 데이터의 시간간격 .....	65
Figure 4-6 직접 제작한 스마트폰 센서 데이터 전송 어플리케이션 .....	66
Figure 4-7 실시간 항법 프로그램.....	67
Figure 4-8 실시간 하프 사이클 슬립 발생기.....	67
Figure 4-9 의사위성 단독과 결합항법 결과의 정적상황	

위치오차 비교 .....	68
Figure 4-10 동적상황 X축 위치오차.....	69
Figure 4-11 동적상황 Y축 위치오차.....	70
Figure 4-12 하프 사이클 슬립 발생 Flag .....	71
Figure 4-13 Monitoring Value.....	71
Figure 4-14 하프 사이클 슬립이 보상된 궤적과 보상되지 않은 궤적 비교 .....	72
Figure 4-15 하프 사이클 슬립을 보상해 주지 않고 있는 실시간 영상.....	73
Figure 4-16 하프 사이클 슬립을 보상해주고 있는 실시간 영상 .....	74

## 표 목차

Table 2-1 사용된 의사위성 시스템에 대한 정보 .....	8
Table 2-2 CDGPS 정지상태 위치오차.....	10
Table 2-3 가속도계 Noise 수준.....	12
Table 2-4 추정된 가속도계 Scale Factor .....	15
Table 2-5 자이로스코프 Noise 수준.....	17
Table 2-6 추정된 자이로스코프 Scale Factor .....	20
Table 2-7 ‘KOBUKI’ 로봇에 장착된 채로 측정하여 추정된 자이로스코프 Scale Factor.....	21
Table 2-8 Process Noise .....	39
Table 2-9 Measurement Noise .....	40
Table 3-1 측정치 시간간격에 따른 위치오차 $3\sigma$ .....	52
Table 4-1 의사위성 단독과 결항항법 결과의 정적상황 위치오차 비교 .....	68

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구 동기 및 목적

최근 전 세계적으로 많은 사람들이 위성항법시스템(GNSS, Global Navigation Satellite System)을 통한 위치정보 서비스를 사용하고 있다. 이 위성항법 시스템은 시각이 동기 된 위성 들에서 방송하는 신호를 사용자 수신기에서 수신한 뒤 위성과 사용자 사이의 거리를 계산하고, 삼각 측량의 원리로 사용자에게 위치를 알 수 있게 해주는 시스템이다. GPS등의 위성항법 시스템들은 군사적으로도 매우 중요하며 육상, 해상, 항공 모두에서 중요한 항법 시스템으로 사용되고 있다. 또한 점차 정보 통신 기술이 발전해 나가면서 그 영향력은 더욱더 증가할 것으로 예상된다.

그러나 위성 항법 시스템은 위성에서 보낸 신호가 닿지 않는 실내에서는 사용할 수 없다는 단점이 있다. 현대인들은 점차 실내 생활 시간이 증가하고 있기 때문에 만약 실내에서도 정밀한 항법이 가능해 진다면 실외의 위성항법 시스템만큼의 큰 파장을 불러올 것이라 생각된다.

이러한 흐름에 발맞추어 RFID, Wi-Fi, Visual Sensor, IMU 및 의사위성 등 다양한 방식의 실내항법들이 연구되고 있으나 아직 이렇다 할 확실한 시스템은 개발되어 있지 않은 상황이다 [27-32] [35-36]. 그 중 의사위성의 경우 실제 GPS 위성에서 송신하는

신호와 유사한 신호를 생성하는 장치로 기존의 GPS 수신기를 거의 그대로 사용할 수 있다. 또한 의사위성의 Carrier Phase를 이용한 방법은 높은 정확도의 위치결과를 얻을 수 있다는 장점이 있다 [2, 5, 18, 33]. 하지만 Carrier Phase를 이용할 경우 사이클 슬립 발생에 대한 문제가 있으며 특히 실내 환경의 경우 Signal Block, Near/Far Problem, 멀티패스 등에 의해 외부환경보다 사이클 슬립의 발생률이 훨씬 높다 [2]. 이에 따라 하프 사이클 슬립의 발생률 또한 증가하여 단순히 사이클 슬립만이 아닌 하프 사이클 단위의 슬립까지 해결해 주어야 한다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 의사위성과 스마트폰 내의 초저가 IMU센서의 결합을 통하여 하프 사이클 단위의 슬립까지 검출 및 보상하고자 한다. 그에 더해 ‘KOBUKI’ 로봇과 스마트폰을 이용하여 실제로 실시간 항법을 구현함으로써 의사위성/초저가 IMU의 결합항법과 그를 통한 하프 사이클 슬립의 검출 및 보상이 실시간으로도 잘 이루어짐을 확인하고자 한다.

## 제 2 절      연구 동향

본 논문은 의사위성과 초저가 IMU결합을 통해 하프 사이클 슬립을 검출 및 보상하여 정밀하고 안정적인 실내 항법을 수행하기 위한 연구에 대한 논문이다. 그렇기 때문에 의사위성과 IMU를 결합한 실내 항법에 관한 연구들과 사이클 슬립 검출 및 보상에

관한 연구들을 살펴본다.

의사위성은 GPS와 같은 방식의 항법시스템으로 신호가 잡히지 않는 동안에는 위치를 계산할 수 없다. 또한 정지해 있는 동안에는 위치가 계산되더라도 heading에 대한 정보는 알 수 없다. 즉 어느 방향으로든 이동이 있어야만 heading을 계산할 수가 있다. 이러한 문제들에 대한 해결방법으로 IMU를 이용한 항법인 INS를 결합하여 항법을 수행하는 연구들이 진행되어 왔다 [3, 6-9, 10-17, 21-24]. 이 결합항법은 신호가 잡히지 않는 동안에도 INS를 통해 항법을 유지할 수 있도록 해주며 정지해 있는 동안에도 heading에 대한 정보를 계속 알 수 있도록 해준다 [26]. 또한 센서들의 결합을 통해 위치오차의 수준이 감소한다는 장점과 위치정보 제공의 frequency를 높여준다는 장점도 있다. 이에 더해 Carrier Phase를 이용한 항법의 경우 사이클 슬립 검출 및 보상을 수행함에 있어서도 장점이 있다 [1, 4, 19, 25, 34, 37].

사이클 슬립 검출 방식에는 GNSS 수신기 만을 사용하는 방식과 GNSS/INS 복합 항법을 사용하는 방식으로 나눌 수 있다. 먼저 GNSS 수신기 만을 사용할 경우의 사이클 슬립 검출 방식은 측정치에 따라 다시 두 가지로 나눌 수 있다. 첫번째는 다중 주파수 측정치 기반 방식 [38], 두 번째는 단일 주파수 측정치 기반 방식 [39]이다. 다중 주파수 측정치 기반 방식은 여러 주파수의 측정치 조합을 활용하여 사이클 슬립을 검출하는 방식이다. 이 방식의 경우 높은 확률로 사이클 슬립 검출이 가능하지만 다중 주파수 GNSS 수신기가 있어야만 가능하다는 문제가 있다. 다중 주파수 수신기는

가격이 굉장히 비싸기 때문이다. 따라서 일반적인 사용자들이 사용하는 저가 GNSS 수신기에서 사이클 슬립을 검출 하기 위해서는 단일 주파수 측정치 기반의 사이클 슬립 검출 방식을 적용해야 한다. 단일 주파수 측정치 기반 방식은 사용 가능한 측정치가 제한되어 있기 때문에 사이클 슬립 검출 성능이 다중주파수에 비해 떨어진다. 특히 GNSS 수신기는 출력 주기가 낮기 때문에 동적상황에서는 더욱 검출이 어렵다.

GNSS와 INS를 복합적으로 이용하여 사이클 슬립을 검출하는 방식 [1, 4, 34, 37]이 있다. INS를 이용한 사이클 슬립 검출 방식은 INS를 이용하여 반송파 측정치를 추정하고 이 추정치와 GNSS 수신기의 반송파 측정치의 차이를 모니터링 함으로써 사이클 슬립을 검출한다. INS는 GNSS 수신기와는 달리 100Hz 이상의 높은 출력 주기를 가지기 때문에 동적 환경에 취약한 단일 주파수 측정치 기반 사이클 슬립 검출 알고리즘의 단점을 보완한다. 따라서 INS를 이용하여 반송파 측정치 추정 정확도를 높임으로써 사이클 슬립 검출 성능 향상이 가능하다. 그러나 의사거리 측정치를 활용할 경우에는 역시 높은 잡음 수준에 의해 사이클 슬립 검출 성능이 저하되는 문제가 있다. 반송파 측정치를 활용하는 방식 [40]은 단일 주파수 반송파 측정치와 기준국 측정치의 이중차분을 통해 전리층, 대류층 지연 등의 오차 요소를 대부분 제거하고 미지정수를 계산한 후 반송파 측정치를 GNSS/INS 필터 측정치로 사용한다. 이 방식은 필터 측정치로 정확도가 높은 반송파 측정치를 사용하기 때문에 사이클 슬립 검출 성능은 좋지만 전리층, 대류층 지연 등의

오차 요소를 제거하기 위해 기준국 데이터가 필요하다. 이를 위해서는 별도의 통신 장비를 추가적으로 사용해야 한다. 또한 미지정수 값을 정확히 계산한 후에 사이클 슬립 검출이 가능하다는 한계 점이 있다.

### 제 3 절      연구 내용 및 방법

본 연구는 의사위성 carrier phase를 이용한 실내 항법 시스템의 사이클 슬립 발생 문제를 초저가 IMU 결합을 통해 해결하는 것에 대한 연구이다.

이를 위해 먼저 의사위성의 carrier phase 측정치를 이용한 실내 항법 시스템에 대해 알아야 한다. 좁은 공간에서의 신호 특성과 실외 환경과 다른 실내의 장단점, 그리고 미지정수 해결에 있어서 유리한 점 등에 대한 이해가 필요하다.

또한 IMU센서에 대한 지식이 있어야 한다. IMU 센서 데이터를 이용해야 하기 때문에 센서 측정치의 bias, noise, random walk, scale factor 등을 분석하고 올바르게 모델링하여 사용해야 한다.

이렇게 IMU로부터 얻은 센서 측정치를 이용하여 관성항법(INS, Inertial Navigation System)을 수행한다. 기본적인 물리법칙을 이용하여 가속도 적분을 통해 위치를 계산하고 각속도 적분을 통해 자세를 계산한다.

이제 의사위성 carrier phase를 이용한 실내항법과 IMU를



이용한 관성항법(INS) 각각의 단점을 보완하고 더욱 개선된 시스템을 개발하기 위해 Extended Kalman Filter (EKF)를 통하여 두 시스템을 결합한다.

의사위성/IMU 결합 시스템의 장점 중 하나인 사이클 슬립 검출을 수행하여 의사위성 carrier phase를 이용한 항법의 문제점인 사이클 슬립 발생문제를 해결한다.

마지막으로 이것을 ‘KOBUKI’ 로봇과 스마트 폰을 이용해 실제로 구현하여 시뮬레이션이 아닌 실제로도 실시간 적용 가능성을 보인다.

## 제 4 절 연구의 기여도

본 연구는 기존 의사위성 carrier phase를 이용한 실내 항법 시스템의 문제로 남아있던 사이클 슬립 문제를 의사위성/초저가 IMU 결합항법을 통해 해결하였으며 사이클 슬립 뿐만 아니라 실내환경에서 쉽게 발생하는 하프 사이클 슬립까지 검출 및 보상함으로써 하프 사이클 슬립에도 강건한 실내 항법 시스템을 구현하였다.

또한 이를 ‘KOBUKI’ 로봇과 스마트 폰을 이용하여 실제로 실시간 구현함으로써 실제 적용 가능성을 보였다.

## 제 2 장 Extended Kalman Filter를 통한 의사위성/초저가 IMU 결합

이 장에서는 의사위성과 초저가 IMU의 결합 과정을 설명한다. 먼저 의사위성 기반 실내항법시스템과 스마트 폰 내의 초저가 IMU 각각에 대해 소개 한 후 EKF 를 통해 두 시스템의 결합을 설명한다. 결합에 필요한 센서 모델링과 데이터 처리, measurement에 관한 내용도 포함되어 있다.

### 제 1 절 의사위성 기반 실내항법시스템

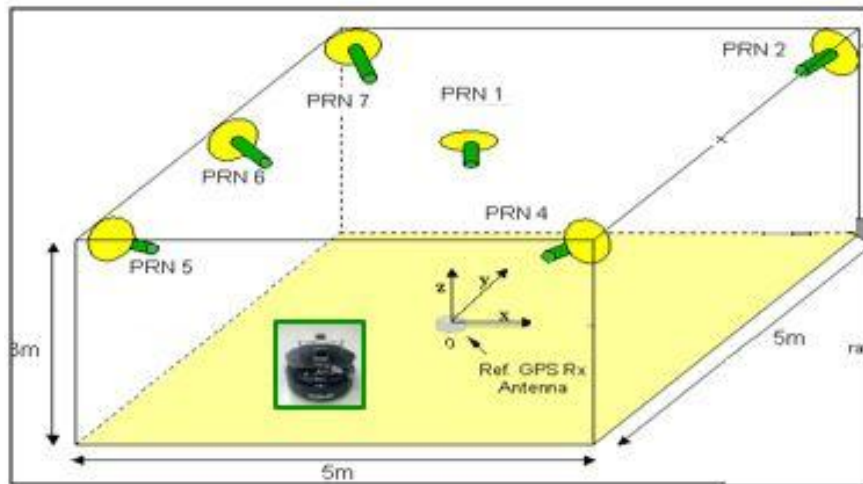


Figure 2-1 실내에 설치된 의사위성 시스템 구성도

Number of Pseudolite	6
Coordinate	Set up indoor
Frequency	10Hz

Table 2-1 사용된 의사위성 시스템에 대한 정보

## 1. 오차 요소

$$\phi_u^i = d_u^i - b^i + B_u + N_u^i \lambda + \varepsilon_u^i \quad (2.1)$$

Carrier phase 오차 요소들을 살펴보면 실내이기 때문에 이온층 오차와 대류층 오차는 없으며 멀티패스 오차와 위성 위치오차는 없다고 가정했다. 실제로는 실내 환경이기 때문에 멀티패스에 의한 영향을 완전히 무시할 수는 없고 의사위성의 위치 또한 어느정도 오차가 존재하지만 간단한 수식 전개를 위하여 우선은 없다고 가정하였다.

## 2. CDGPS

CDGPS 알고리즘은 다음과 같다. 우선 아래와 같이 carrier phase 이중차분을 통해 수신기 시계오차와 위성 시계오차를 제거한다.

$$\begin{aligned} {}_r\Delta_u \phi &= {}_r\Delta_u (d + B + N\lambda + \varepsilon) \\ {}^i\nabla^j \phi &= {}^i\nabla^j (d - b + N\lambda + \varepsilon) \\ {}^i\nabla^j {}_r\Delta_u \phi &= \nabla \Delta (d + N\lambda + \varepsilon) \end{aligned} \quad (2.2)$$

이제 미지정수를 제거해 주어야 하는데 이는 사용자의 위치를 미리 알 수 있는 실내환경이라는 이점을 이용한다. 사용자가 알고 있는 위치에서 항법을 시작하게 되면 정확한 미지정수를 계산할 수 있고 계산한 미지정수를 식(2.2)에서 제거해 주면 식(2.3)과 같게 된다.

$${}^i\nabla_r^j\Delta_u\phi=\nabla\Delta(d+\varepsilon) \quad (2.3)$$

이제 측정치에 거리 항과 noise 항만 남게 되었으므로 least square method를 통해 위치를 계산 할 수 있다.

$$\begin{aligned} {}^i\nabla_r^j\Delta_u\phi &= \nabla\Delta(d+\varepsilon) \\ &= {}_r\Delta_u^i d - {}_r\Delta_u^j d \\ &= [\{(\bar{\mathbf{R}}^i - \bar{\mathbf{R}}_r) \cdot \hat{\mathbf{e}}_r^i - (\bar{\mathbf{R}}^i - \bar{\mathbf{R}}_u) \cdot \hat{\mathbf{e}}_u^i\} \\ &\quad - \{(\bar{\mathbf{R}}^j - \bar{\mathbf{R}}_r) \cdot \hat{\mathbf{e}}_r^j - (\bar{\mathbf{R}}^j - \bar{\mathbf{R}}_u) \cdot \hat{\mathbf{e}}_u^j\}] \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} (\hat{\mathbf{e}}_u^i - \hat{\mathbf{e}}_u^j) \cdot \bar{\mathbf{R}}_u &= {}^i\nabla_r^j\Delta_u\phi - [\{(\bar{\mathbf{R}}^i - \bar{\mathbf{R}}_r) \cdot \hat{\mathbf{e}}_r^i - \bar{\mathbf{R}}^i \cdot \hat{\mathbf{e}}_u^i\} \\ &\quad - \{(\bar{\mathbf{R}}^j - \bar{\mathbf{R}}_r) \cdot \hat{\mathbf{e}}_r^j - \bar{\mathbf{R}}^j \cdot \hat{\mathbf{e}}_u^j\}] \end{aligned}$$

$$H\hat{\mathbf{x}} = \bar{\mathbf{z}}$$

정지상태 위치오차는 Table 2-2와 같다.

	$1\sigma$
X	2.5mm
Y	2.9mm

Table 2-2 CDGPS 정지상태 위치오차

## 제 2 절 초저가 IMU

본 연구에서 사용한 초저가 IMU 센서는 스마트폰 Galaxy S7에 내장된 가속도계와 자이로스코프이다. 스마트폰에 설정된 body 좌표계는 Figure 2-2와 같다.

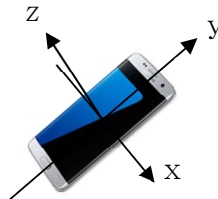


Figure 2-2 Galaxy S7 좌표계

### 1. 가속도계

$$f_m = Sf + b_{tv} + b_c + w \quad w \sim N(0, \sigma_w^2)$$

$f_m$ : Accelerometer Measurement  
 $S$ : Scale Factor  
 $f$ : True Acceleration  
 $b_{tv}$ : Time Varying Bias  
 $b_c$ : Constant Bias  
 $w$ : Noise

(2.5)

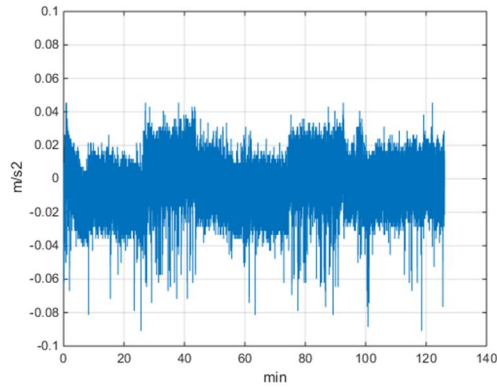


Figure 2-3 가속도계 정적 데이터

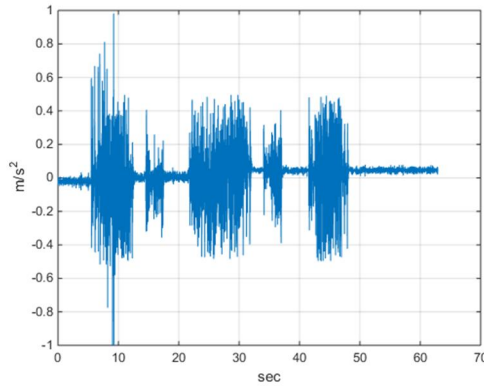


Figure 2-4 가속도계 동적 데이터

	정적	동적
Noise	0.011 m/s <sup>2</sup>	0.25 m/s <sup>2</sup>

Table 2-3 가속도계 Noise 수준

가속도계의 noise 수준은 Table 2-3과 같고 동적상황에서의 noise는 진동에 의한 영향이 포함된 수치이다. EKF 에서는 가속도계에 측정된 진동을 noise로 취급하기 위해 process noise에 센서 noise가 아닌 진동이 측정된 동적상황의 noise 수준을 사용한다.

Bias의 경우 Figure 2-3를 보면 정적상황에서도 센서 자체에 time varying bias가 존재하는 것을 볼 수 있다. 또한 Figure 2-4을 보면 센서 bias 보다 더 큰 크기의 bias들이 존재 하는 것을 볼 수 있다. 이는 ‘KOBUKI’ 로봇이 정확히 수평을 유지하며 기동하는 것이 아니기 때문에 로봇의 자세에 따라 측정되는

중력가속도 성분이다. 만약 3D GPS/INS 결합을 하는 경우라면 이는 bias 오차가 아닌 자세에 대한 측정치일 수 있다. 하지만 본 연구에서는 수평을 가정한 2D GPS/INS 결합을 수행하기 때문에 수평방향 기동에 의한 가속도 발생 이외의 가속도 측정값들은 모두 bias 오차가 된다.

Scale factor의 경우 각 축에 대해 Figure 2-5와 같은 실험을 통해 구하였다. 한 축에 대해 중력가속도만 측정되도록 정확히 수직으로 세워 측정을 한 후 그 축을 다시 정확히 수평으로 눕혀 그 축의 센서 bias를 측정한다.



Figure 2-5 가속도계 Scale Factor 실험

그리고 측정한 중력가속도 데이터에서 bias를 제거해 주면 식(2.6)과 같이 된다. 물론 여기서 bias는 constant로 가정하였다.

$$f_m = Sf + w \quad (2.6)$$



Bias가 제거된 중력가속도 측정치를 이용해 식(2.7)을 계산하면 scale factor를 추정할 수 있다. 여기서  $f = g$  이며 서울대학교 302동 연구실의 Local Gravity 값은 독일 PTB 사이트에서 제공하는 프로그램을 통해 얻은  $9.799102 \text{ m/s}^2$  를 사용하였다.

$$\begin{aligned}
 f_m(1) &= Sf(1) + w(1) \\
 &\vdots \\
 f_m(n) &= Sf(n) + w(n) \\
 \sum f_m(i) &= nSf + \sum w(i)
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

$$\hat{S} = \frac{\sum f_m(i)}{nf} = S + \frac{\sum w(i)}{nf}$$

Scale factor를 추정하기 전에 먼저 scale factor에 대한 variance를 이론적으로 전개해 봄으로써 높은 신뢰도의 scale factor를 추정할 수 있는 방법들을 확인할 수 있다. 이론적으로 전개한 scale factor의 variance는 식(2.8)과 같다.

$$\begin{aligned}
\text{var}[\hat{S}] &= \text{var}\left[S + \frac{\sum w(i)}{nf}\right] \\
&= E\left[\left(S + \frac{\sum w(i)}{nf} - E\left[S + \frac{\sum w(i)}{nf}\right]\right)^2\right] \\
&= E\left[\left(S + \frac{\sum w(i)}{nf} - S\right)^2\right] \\
&= E\left[\left(\frac{\sum w(i)}{nf}\right)^2\right] \\
&= \frac{1}{n^2 f^2} E\left[\left(\sum w(i)\right)^2\right] \\
&= \frac{1}{n^2 f^2} E\left[\sum w(i)^2\right] \quad \because w(i), w(j) \text{ independent} \\
&= \frac{1}{n^2 f^2} \sum E[w(i)^2] \\
&= \frac{1}{n^2 f^2} n \sigma_w^2 \\
&= \frac{1}{nf^2} \sigma_w^2 \tag{2.8}
\end{aligned}$$

Scale factor variance의 수식을 보면 측정 시간(epoch)이 길수록 또 참 가속도의 크기가 클수록 신뢰도가 높아진다는 것을 알 수 있다. Figure 2-5에서 보였던 scale factor 구하는 방식으로는 가속도의 크기를 크게 할 수 없으니 측정 시간을 길게함으로써 높은 신뢰도의 scale factor를 계산한다. 계산 결과는 Table 2-4와 같다.

	X축	Y축
Scale Factor	0.991	0.990

Table 2-4 추정된 가속도계 Scale Factor

## 2. 자이로스코프

$$\omega_m = S\omega + b_{iv} + b_c + w \quad w \sim N(0, \sigma_w^2)$$

$\omega_m$ : Gyroscope Measurement  
 $S$ : Scale Factor  
 $\omega$ : True Gyroscope  
 $b_{iv}$ : Time Varying Bias  
 $b_c$ : Constant Bias  
 $w$ : Noise

(2.9)

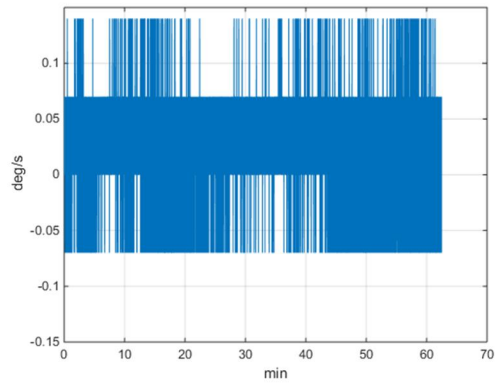


Figure 2-6 자이로스코프 정적 데이터

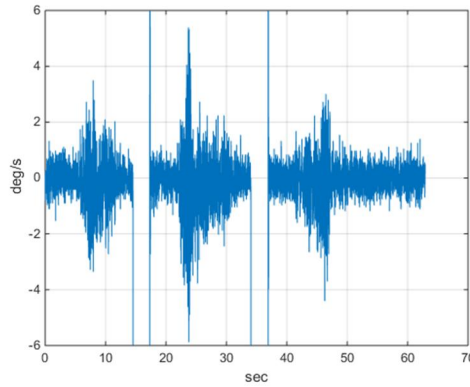


Figure 2-7 자이로스코프 동적 데이터

	정적	동적
Noise	0.0395 deg/s	3.6 deg/s

Table 2-5 자이로스코프 Noise 수준

자이로스코프의 noise 수준은 Table 2-5와 같다. 역시 동적상황의 noise는 진동이 측정된 수치이며 이후 EKF 의 process noise에서는 진동에 의한 측정을 noise로 취급하기 위해 동적상황의 noise 수준을 사용한다.

Figure 2-6의 정적 데이터를 보면 가속도계와 달리 시간이 지나도 bias에 변화가 없는 것을 확인 할 수 있다. 또한 Figure 2-7의 동적상황이라도 자세 등이나 기동에 따른 추가적인 bias 발생이 없다.

Scale factor는 Figure 2-8과 같은 실험을 통해 구하였다. 본 연구는 2D 상황에 대한 가정을 하였기 때문에 z축 자이로스코프에

대한 scale factor만 구하였다. z축에 대해 회전 시키기 위해 턴 테이블 중앙에 z축으로 회전 할 수 있도록 스마트폰을 위치 시킨다. 그리고는 목표각도만큼 회전 시켜 각속도를 측정한다. 측정된 각속도를 적분하여 계산된 각도와 실제로 회전 시켰던 목표각도와의 비를 계산함으로써 scale factor를 구한다.

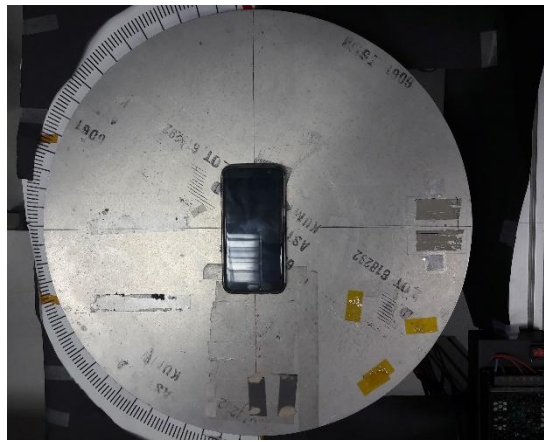


Figure 2-8 자이로스코프 Scale Factor 실험

계산식은 식 (2.10) 과 같다.

$$\begin{aligned}
\omega_m(1) &= S\omega(1) + w(1) \\
&\vdots \\
\omega_m(n) &= S\omega(n) + w(n) \\
\sum \omega_m(i) &= \sum S\omega(i) + \sum w(i)
\end{aligned} \tag{2.10}$$

$$\begin{aligned}
\sum \Delta t \omega_m(i) &= \sum S \Delta t \omega(i) + \sum \Delta t w(i) \\
\hat{S} &= \frac{\sum \Delta t \omega_m(i)}{\sum \Delta t \omega(i)} = S + \frac{\sum \Delta t w(i)}{\sum \Delta t \omega(i)}
\end{aligned}$$

자이로스코프 역시 추정한 scale factor가 어떠한 경우에 높은 신뢰도를 가지는지 variance를 이론적으로 전개해 봄으로써 확인해 본다. 전개한 결과는 식(2.11)과 같다.

$$\begin{aligned}
var[\hat{S}] &= var[S + \frac{\sum \Delta t w(i)}{\theta_{true}}] \quad \because \theta_{true} = \sum \Delta t \omega(i) \\
&= E[(S + \frac{\sum \Delta t w(i)}{\theta_{true}} - E[S + \frac{\sum \Delta t w(i)}{\theta_{true}}])^2] \\
&= E[(S + \frac{\sum \Delta t w(i)}{\theta_{true}} - S)^2] \\
&= E[(\frac{\sum \Delta t w(i)}{\theta_{true}})^2] \\
&= \frac{1}{\theta_{true}^2} E[(\sum \Delta t w(i))^2] \\
&= \frac{1}{\theta_{true}^2} E[\sum (\Delta t w(i))^2] \quad \because w(i), w(j) independent \\
&= \frac{1}{\theta_{true}^2} \sum \Delta t^2 E[w(i)^2] \\
&= \frac{1}{\theta_{true}^2} \sum \Delta t^2 \sigma_w^2 \\
&= \frac{1}{\theta_{true}^2} n \Delta t^2 \sigma_w^2
\end{aligned} \tag{2.11}$$

결과를 보면 측정한 각도가 클수록, 측정 시간(epoch)이 짧을수록, 데이터 시간간격이 작을수록 신뢰도가 높아지는 것을 알 수 있다. 데이터 시간간격은 100Hz로 설정했기 때문에 고정이며 측정 각도와 측정 시간에 대해 신뢰도를 높이는 방향으로 실험을 수행하였다. 그 결과 추정된 scale factor는 Table 2-6과 같다.

	Z축
Scale Factor	0.9998

Table 2-6 추정된 자이로스코프 Scale Factor

하지만 실제 ‘KOBUKI’ 로봇에 장착한 채로 일정 각도를 회전한 후 scale factor를 계산하여 보면 진동 등에 의한 영향으로 scale factor가 크게 변하는 것을 확인하였다. 그렇기 때문에 실제 INS Propagation에 적용할 때에는 ‘KOBUKI’ 로봇에 장착된 채로 측정하여 추정된 scale factor를 사용하였다. 그 값은 Table 2-7과 같다.

	Z축
Scale Factor	1.0982

Table 2-7 ‘KOBUKI’ 로봇에 장착된 채로 측정하여 추정된 자이로스코프 Scale Factor

### 3. 센서 데이터 이상 현상

스마트 폰이 어느 한 축이라도 수평을 유지할 경우 Figure 2-9, Figure 2-10과 같은 이상현상이 발생한다. 우선 가속도계는 수평상태에서  $0.045491 \text{ m/s}^2$  라는 값을 중심으로 Figure 2-9와 같이 일반적이지 않은 이상한 형태로 측정된다. 또한 이렇게 한 축이라도 수평 상태가 유지되면 자이로스코프 데이터에도 역시 Figure 2-10과 같은 이상현상이 발생한다.



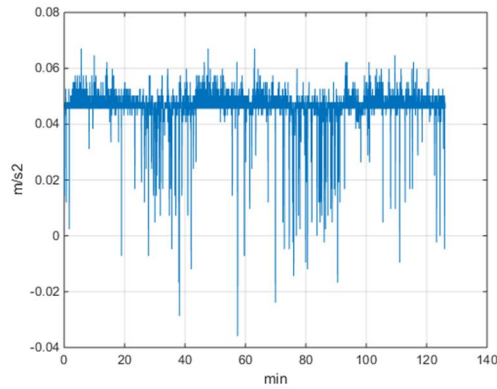


Figure 2-9 가속도계 데이터에 나타난 이상현상

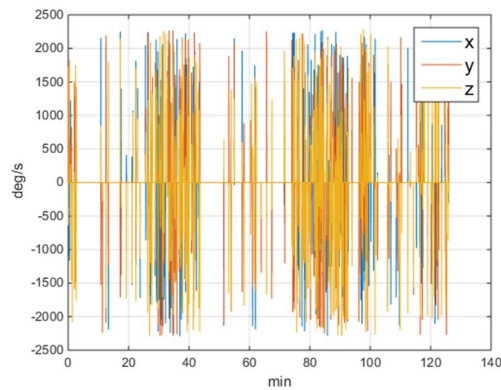


Figure 2-10 자이로스코프 데이터에 나타난 이상현상

사실 Figure 2-9와 같이 가속도계에 발생한 현상은 가속도계의 센서 noise 수준 보다도 작은 수준이므로 데이터 사용에 큰 문제는 되지 않는다. 물론 뒤에 필터 bias 추정 부분에서는 문제가 되는데 이는 뒤에서 해결방법과 함께 다시 설명하도록 하겠다.

문제는 자이로스코프 데이터에 발생한 현상인데, Figure 2-10을 보면 각속도가 엄청나게 큰 값으로 튀기 때문에 이 데이터가 그대로 사용된다면 큰 오차를 발생시킬 것이다. 이 또한 뒤에서 해결방법과 함께 다시 설명하도록 하겠다.

### 제 3 절 전체 시스템 구성

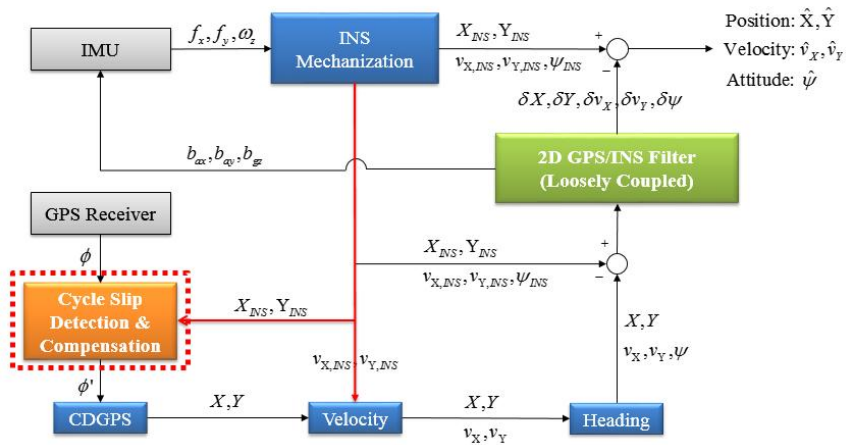


Figure 2-11 시스템 Block Diagram

기본적인 2D GPS/INS loosely coupled 결합에 하프 사이클 슬립 검출 및 보상기가 추가 되었고, 속도 measurement를 INS 속도 output과 CDGPS 위치결과를 결합하여 사용한다는 점이 특이사항이다.

## 제 4 절 Extended Kalman Filter

EKF 는 Figure 2-12와 같은 과정을 반복하며 위치, 속도, 자세 및 bias를 추정한다.

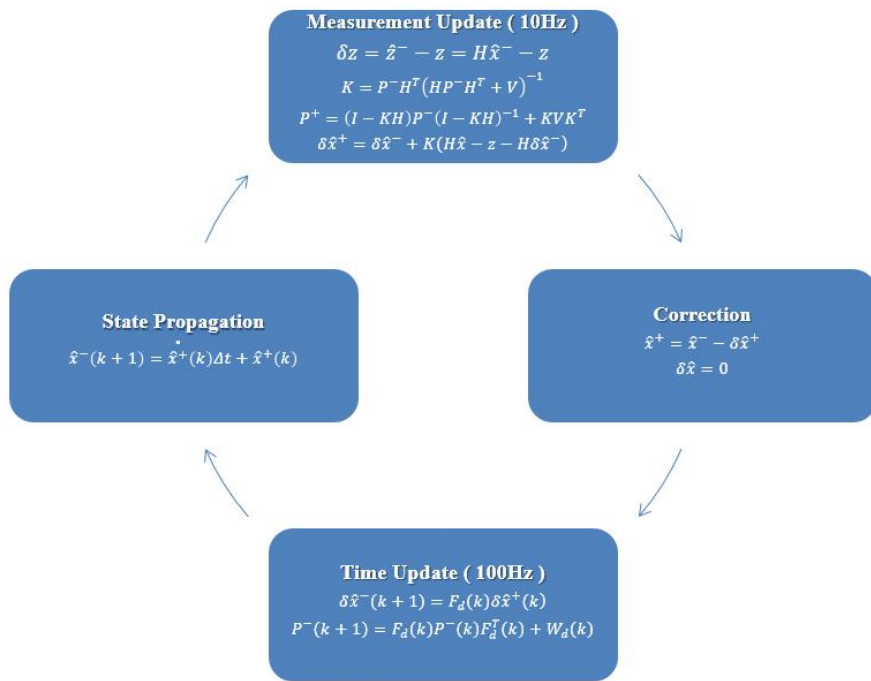


Figure 2-12 Extended Kalman Filter

Discretization은 Van Loan's Algorithm을 사용하였고 식(2.12)와 같다.

$$\begin{aligned}
C &= \begin{bmatrix} -F & GQ_w G^T \\ 0 & F^T \end{bmatrix} \\
EM = \mathbf{e}^{C\Delta t} &= \begin{bmatrix} F_2 & G_2 \\ 0 & F_3 \end{bmatrix} \\
F_d &= F_3^T \\
W_d &= F_3^T G_2
\end{aligned} \tag{2.12}$$

## 1. State

$$State = \begin{bmatrix} y \\ x \\ V_y \\ V_x \\ \psi \\ b_{fx} \\ b_{fy} \\ b_{\omega z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y \text{ axis postion} \\ x \text{ axis postion} \\ y \text{ axis velocity} \\ x \text{ axis velocity} \\ heading \\ x \text{ axis accelerometer bias} \\ y \text{ axis accelerometer bias} \\ z \text{ axis gyroscope bias} \end{bmatrix} \tag{2.13}$$

2D 가정 이므로 수평 방향에 대한 위치, 속도, 자세가 포함 되어 있고 가속도계와 자이로스코프의 bias 역시 함께 추정하여 측정치에서 제거해 주게 되는데 이 역시 수평 방향에 대한 축만 포함된다.

## 2. Nonlinear Equation

$$\begin{aligned}
\dot{Y} &= V_Y \\
\dot{X} &= V_X \\
\begin{bmatrix} \dot{V}_Y \\ \dot{V}_X \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_X \\ f_Y \end{bmatrix} \\
\dot{\psi} &= \omega_Z \\
\dot{b}_{fx} &= -\alpha_{fx} b_{fx} \\
\dot{b}_{fy} &= -\alpha_{fy} b_{fy} \\
\dot{b}_{\omega z} &= 0
\end{aligned} \tag{2.14}$$

Nonlinear equation은 실내에 설정된 좌표계 사용과 2D 가정에 의해 식(2.14)와 같이 매우 간단한 형태로 정리되며 bias의 경우 5절의 센서 bias 모델링에서 다시 설명하도록 하겠다.

### 3. State Equation

선형화를 거치면 식(2.15)와 같이 되며 F와 G matrix는 각각 식(2.16)과 같다.

$$\dot{\delta x} = F\delta x + Gw \tag{2.15}$$

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -f_x \sin \psi - f_y \cos \psi & -\cos \psi & \sin \psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & f_x \cos \psi - f_y \sin \psi & -\sin \psi & -\cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\alpha_{fx} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\alpha_{fy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

## 제 5 절 Sensor Bias Modeling 및 데이터 이상현상 해결

2절에서 확인한 IMU의 bias들을 제거해 주기 위하여 EKF에서 bias도 함께 추정한다. 가속도계와 자이로스코프의 bias 특성이 서로 다르므로 각각의 특성에 맞도록 모델링 하였다. 또한 센서에 존재하는 데이터 이상 현상도 실시간으로 해결하며 EKF가 수행된다.

## 1. 가속도계 Bias Modeling

앞서 2절에서 확인한 바에 의하면 가속도계의 센서 bias는 시간에 따라 변화하는 time varying bias를 가졌다. 또한 센서 자체의 bias 뿐 아니라 자세에 따라 측정되는 중력가속도 성분까지 오차로 존재한다. 정지상태에서 측정한 센서 자체의 bias 는 Figure 2-3에서 볼 수 있으며 자세 변화에 따라 측정되는 중력가속도 성분은 Figure 2-4에서 볼 수 있다. 물론 3D에 대한 경우라면 자세 변화에 따른 중력가속도 성분은 자세에 대한 측정치 일 수 있다. 하지만 본 연구는 2D를 가정 하였으므로 실제 움직임에 의해 측정된 가속도가 아닌 나머지 측정값들은 모두 bias 오차가 된다. 예를 들면 실제로는 움직이지 않고 있는데 자세에 의한 중력가속도 성분에 의해 위치가 이동하는 것으로 계산되어 오차가 발생하는 경우이다.

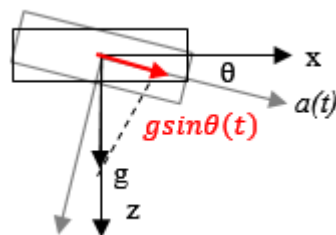


Figure 2-13 자세에 따라 수평 축에 측정되는 중력가속도 성분

이러한 중력가속도 성분에 의한 오차까지 bias에 포함하여 모델링하였으며 수식은 식 (2.17)과 같다.

$$\dot{b} = -\alpha b \quad (2.17)$$

## 2. 자이로스코프 Bias Modeling

자이로스코프의 경우는 2절에서 확인한 바와 같이 constant bias를 가진다. 그러므로 식 (2.18)과 같이 모델링 하였다.

$$\dot{b} = 0 \quad (2.18)$$

## 3. 가속도계 데이터 이상 문제 해결

2절에서 한번 언급했듯이 가속도계에 발생한 데이터 이상은 그 측정치 자체로는 문제가 되지않는다. 실제 측정되어야 할 가속도 값을 중심으로 noise 수준보다도 작은 수준으로 발생하기 때문이다.

하지만 EKF 에서는 그 작은 수준이 문제를 발생시킨다. 가속도계의 bias를 제거해주기 위해 bias를 추정해야 하는데 이상현상이 발생한 부분에서는 noise 수준이 너무 작아서 bias를 제대로 추정하지 못하는 것이다. 그렇게 잘못 추정된 bias를 데이터에서 빼게 되면 잘못 추정된 만큼의 bias 오차가 또 남아 있게 되는 것이며 심지어 그 오차는 기존의 bias보다 그 크기도



크고 변화도 심하다.

그렇기 때문에 가속도 데이터를 사용하기 전에 이 문제가 발생할 때 마다 가속도 데이터를 가공해야 할 필요가 있다. 우선 이 이상현상이 발생하는 가속도 측정값인  $\pm 0.045491 \text{ m/s}^2$  근처의 값이 측정되었을 경우를 이상데이터로 검출한다. 그 범위는  $\pm 0.045491 \text{ m/s}^2$  을 중심으로  $\pm 0.000001 \text{ m/s}^2$  이라는 굉장히 좁은 범위로 결정 하였다. 그 이유는 너무 넓은 범위 내의 데이터들을 이상 데이터로 검출하게 되면 정상적인 데이터들까지 검출해 버리게 되기 때문이며, 이렇게 좁은 범위의 데이터만 검출해 내어도 충분히 많은 데이터가 검출되어 문제가 잘 해결되기 때문이다. 이렇게 검출해 낸 이상 데이터를  $\pm 0.045491 \text{ m/s}^2$  을 평균으로 하는 가속도계 정상 noise 수준( $0.011 \text{ m/s}^2$ )의 데이터로 만들어 준 뒤에 데이터를 사용하였다. 데이터 가공 전의 이상 데이터는 Figure 2-14 이고 정상적인 가속도계 noise 수준으로 가공해 준 데이터는 Figure 2-15 이다.

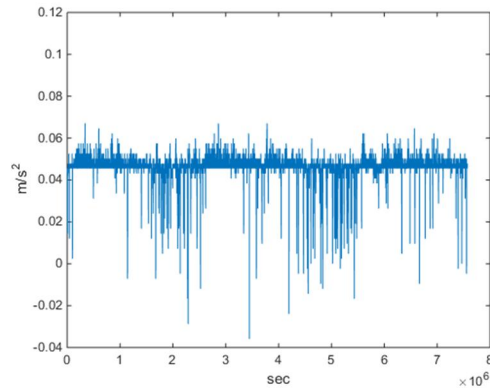


Figure 2-14 이상현상 해결 이전의 가속도계 데이터

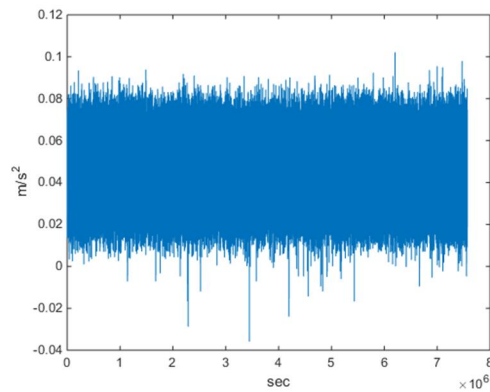


Figure 2-15 이상현상 해결 이후의 가속도계 데이터

#### 4. 자이로스코프 데이터 이상 문제 해결

자이로스코프에 발생하는 이상 현상은 2절에서도 보았듯이 센서가 수평 상태로 유지되면 데이터가 굉장히 큰 값으로 튀는 현상이다. 이 경우는 그렇게 큰 값으로 튈 데이터들을 검출하여

제거해주면 된다.

본 연구는 2D 가정이므로 자이로스코프의 Z축 데이터만 필요로 하지만 이 이상현상을 검출하기 위해서는 Z축 데이터만으로는 불가능 하다. 왜냐하면 Z축 데이터에는 우리가 필요로 하는 회전에 대한 측정치가 기록되기 때문에 회전에 대한 측정치와 이상 현상을 구별하여 검출할 수 없기 때문이다. 하지만 다행히도 이 이상 현상은 X, Y, Z 축 모두에서 동시에 발생하며 이 특성을 이용하여 해결 할 수 있다. 검출은 X축 또는 Y축에서 수행 한 뒤 이상 현상이 검출되면 그 epoch의 Z축 데이터를 이전 epoch의 Z축 데이터로 교체 해주면 되는 것이다. 검출 threshold는 6 deg/s 로 결정하였다. 왜냐하면 이상 현상의 최소 크기는 약 10 deg/s 정도 이고 자이로스코프 X축, Y축 데이터의 동적상황 noise  $3\sigma$  수준은 5.5 deg/s 인데 miss detection이 발생하면 문제가 있지만 false alarm은 발생하더라도 별 문제가 되지 않으므로 threshold를 동적상황의 noise 에 더 가까운 값으로 선택 한 것이다.

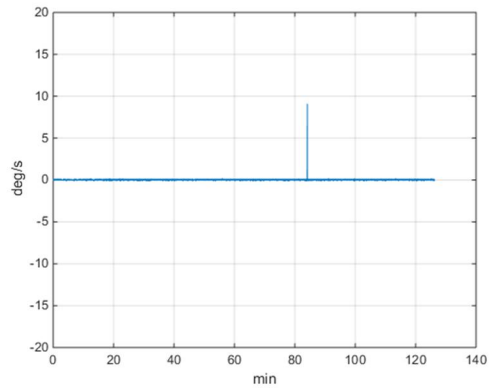


Figure 2-16 자이로스코프 이상 현상 그래프 중 최소값

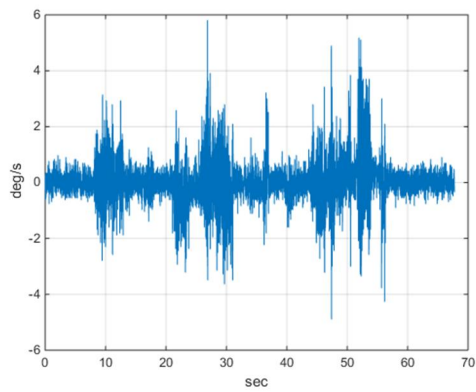


Figure 2-17 자이로스코프 X축 동적 데이터

이러한 방법을 통해 Figure 2-18 자이로스코프 데이터에 존재하던 이상 현상을 Figure 2-19와 같이 제거한 것을 확인할 수 있다.

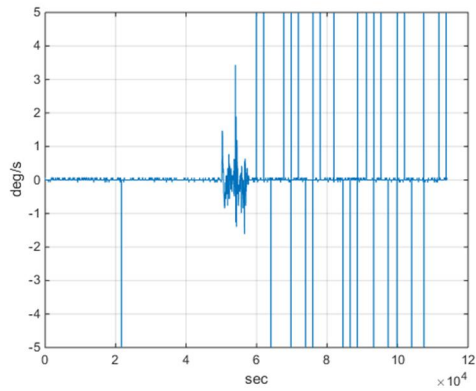


Figure 2-18 이상현상 제거 전의 자이로스코프 데이터

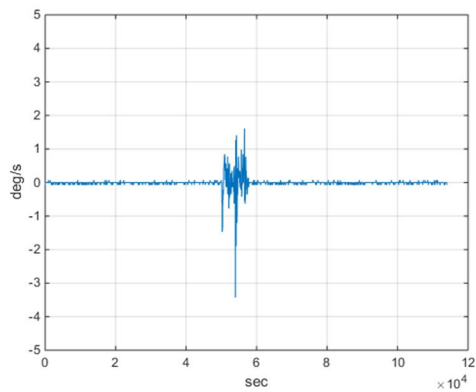


Figure 2-19 이상현상 제거 후의 자이로스코프 데이터

## 제 6 절 속도, heading Measurement

### 1. 속도 Measurement

속도 measurement의 경우 도플러 측정치를 이용하여 구할 수도 있지만 도플러 측정치는 ‘KOBUKI’ 로봇의 느린 속도에 비해 상대적으로 noise 가 크기 때문에 Figure 2-20과 같이 속도가 noise 에 묻혀 잘 나타나지 않는다.

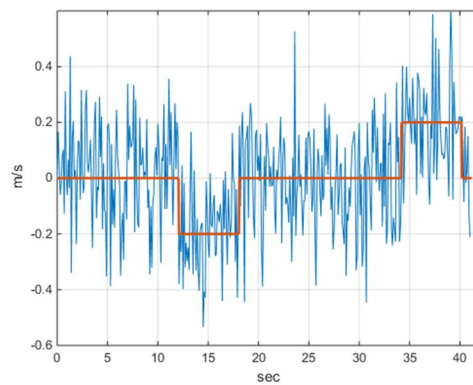


Figure 2-20 도플러를 이용하여 계산한 속도 데이터

그러므로 noise 수준이 작은 속도데이터를 얻기 위하여 도플러 측정치 대신 Figure 2-21과 같이 의사위성/IMU 결합항법의 속도 추정 결과와 CDGPS 위치결과로부터 계산한 시선 벡터를 이용하여 속도 계산을 하였다.

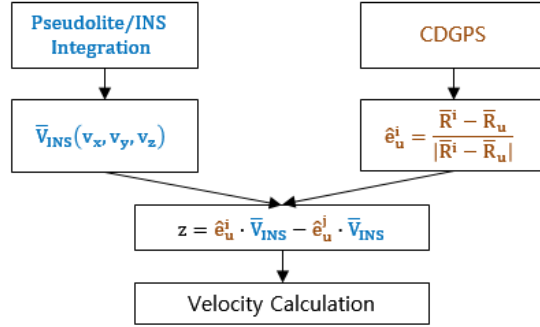


Figure 2-21 결합항법 속도 결과와 CDGPS 위치 결과를 이용한 속도 Measurement

자세한 수식 전개는 식 (2.19)와 같다.

$$\begin{aligned}
 z &= \Delta \nabla(\dot{d}) \\
 &= \Delta \nabla(\dot{D}_u^i \cdot \hat{\mathbf{e}}_u^i + D_u^i \hat{\mathbf{e}}_u^i \cdot \dot{\hat{\mathbf{e}}}_u^i) \\
 &= \Delta \nabla(\dot{D}_u^i \cdot \hat{\mathbf{e}}_u^i) \quad (\because \hat{\mathbf{e}}_u^i \cdot \dot{\hat{\mathbf{e}}}_u^i = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} (\hat{\mathbf{e}}_u^i \cdot \hat{\mathbf{e}}_u^i) = 0) \\
 &= \Delta \nabla((\dot{\bar{\mathbf{R}}}^i - \dot{\bar{\mathbf{R}}}_u) \cdot \hat{\mathbf{e}}_u^i) \\
 &= \Delta \nabla(-\dot{\bar{\mathbf{R}}}_u \cdot \hat{\mathbf{e}}_u^i) \quad (\because \dot{\bar{\mathbf{R}}}^i = 0) \\
 &= \hat{\mathbf{e}}_u^i \cdot \bar{\mathbf{V}}_{INS} - \hat{\mathbf{e}}_u^j \cdot \bar{\mathbf{V}}_{INS} - (\hat{\mathbf{e}}_u^i \cdot \bar{\mathbf{V}}_r - \hat{\mathbf{e}}_u^j \cdot \bar{\mathbf{V}}_r) \quad (\because \dot{\bar{\mathbf{R}}}_u = \bar{\mathbf{V}}_{INS}) \\
 &= \hat{\mathbf{e}}_u^i \cdot \bar{\mathbf{V}}_{INS} - \hat{\mathbf{e}}_u^j \cdot \bar{\mathbf{V}}_{INS}
 \end{aligned} \tag{2.19}$$

이렇게 계산한 결과 Figure 2-22와 같이 noise 수준이 매우 작은 속도 measurement를 얻을 수 있었다.

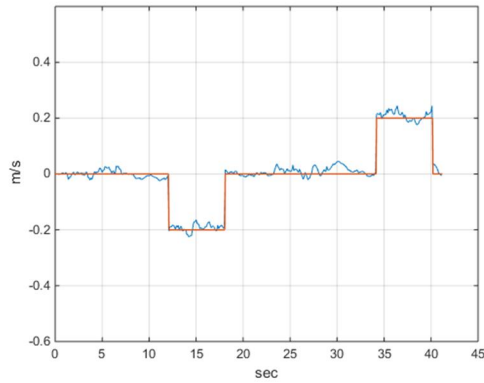


Figure 2-22 결합항법 속도 결과와 CDGPS 결과를 이용한 속도 데이터

물론 이 방법으로 구한 속도 measurement가 noise 수준은 확실히 작지만 문제점도 있다. 속도 measurement 계산에 INS propagation 속도 결과가 사용되기 때문에 가속도 데이터에 직접적으로 영향을 받는 다는 것이다. 가속도계의 성능이 좋지 않기 때문에 측정 오차가 많이 존재하고 2D가정에 의해 수평 방향에 측정된 중력가속도 성분들도 오차가 된다. 이러한 오차들이 고스란히 반영되어 noise 이외에 크게 출렁이는 오차들이 속도 measurement에 나타나게 된다. 이러한 문제는 필터 튜닝과 함께 ‘KOBUKI’ 로봇의 움직임을 부드럽게 해줌으로써 완화시켜 줄 수 있다. 이렇게 최대한 오차를 줄여 주어야 위치 추정오차와 사이클 슬립 monitoring value 잔여오차를 줄일 수 있다.

## 2. 헤딩 Measurement



헤딩은 식(2.20)과 같이 속도데이터를 통해 간단하게 계산할 수 있다.

$$\psi = \tan^{-1}\left(\frac{v_x}{v_y}\right) \quad (2.20)$$

하지만 문제는 너무 낮은 속도에서 헤딩을 계산하게 되면 헤딩오차가 커진다는 것이다. 이 때문에 헤딩 계산에 사용할 속도에 대한 하한선을 결정해야 하는데 이는 다음과 같은 과정에 의해 결정하였다.

먼저 원하는 헤딩오차 수준을 설정한다. 그리고는 Figure 2-23, 식(2.21)과 같이 속도오차와 헤딩오차 사이의 관계를 이용하여 헤딩 계산에 사용할 속도 하한선을 결정한다.

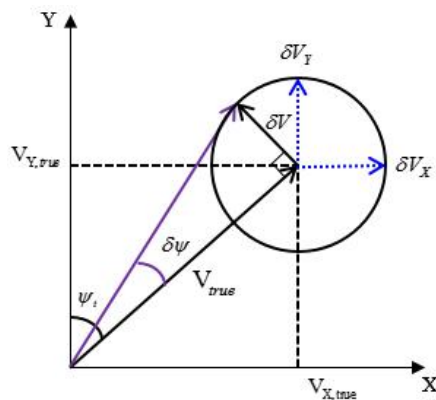


Figure 2-23 속도오차와 헤딩오차 사이의 관계

$$\begin{aligned}
\delta V &\sim N(0, \sigma_V^2) & \delta \psi &\sim N(0, \sigma_\psi^2) \\
\tan \delta \psi &= \frac{\delta V}{|V_{true}|} \\
\therefore |V_{threshold}| &= \frac{\sigma_V}{\tan \sigma_\psi}
\end{aligned} \tag{2.21}$$

## 제 7 절 Process Noise and Measurement Noise

### 1. Process Noise

$$w \sim W(0, Q_w) \tag{2.22}$$

$$Q_w = \begin{bmatrix} \Delta t \sigma_{fx}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \Delta t \sigma_{fy}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta t \sigma_{\omega z}^2 \end{bmatrix}$$

X axis accelerometer $\sigma_{fx}$	0.25 m/s <sup>2</sup>
Y axis accelerometer $\sigma_{fy}$	0.25 m/s <sup>2</sup>
Z axis gyroscope $\sigma_{\omega z}$	3.6 deg/s

Table 2-8 Process Noise

사용한 process noise 수준은 동적상황에서 진동에 의한 측정치들을 이용해 계산한 값이다. 이 값을 사용하는 이유는 진동에

의한 측정까지 모두 noise로 취급해 주기 위해서이다.

## 2. Measurement Noise

$$v \sim N(0, V) \quad (2.23)$$

$$V = \begin{bmatrix} \sigma_y^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_x^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{v_y}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{v_x}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{Heading}^2 \end{bmatrix}$$

Y axis position $\sigma_y$	2.5 mm
X axis position $\sigma_x$	2.9 mm
Y axis velocity $\sigma_{v_y}$	15 mm/s
X axis velocity $\sigma_{v_x}$	15 mm/s
Heading $\sigma_\psi$	10 deg

Table 2-9 Measurement Noise

Measurement noise는 실제 의사위성의 오차 수준과 앞서 계산한 속도와 heading의 오차 수준을 그대로 사용 하였다.

## 제 3 장 하프 사이클 슬립 검출 및 보상

3장에서는 의사위성/IMU 결합을 통한 하프 사이클 슬립 검출 및 보상에 관한 이론과 검출 확률에 대하여 알아본다.

### 제 1 절 의사위성 반송파를 이용한 실내항법에서의 하프 사이클 슬립 발생

반송파를 이용한 항법에서는 사이클 슬립 발생이 항상 문제가 된다. 특히 의사위성을 이용하여 실내에서 항법을 수행할 경우 signal block, near/far problem, 멀티패스 등에 의하여 사이클 슬립이 더욱 쉽게 발생하게 된다. Figure 3-1은 signal block이 없었던 상황에 대한 사이클 슬립 monitoring value 그래프 이다. Signal block이 없었음에도 불구하고 사이클 슬립들이 발생한 것을 볼 수 있다. 물론 이 경우는 사이클슬립이 쉽게 발생한다는 것을 보여주기 위해 가장 심한 경우의 데이터를 고른 것 이다.

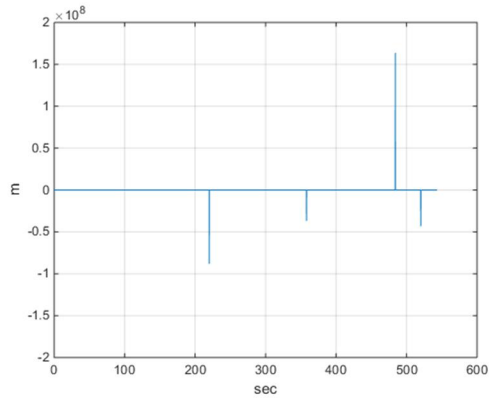


Figure 3-1 Signal block이 없었지만 사이클 슬립이 발생한 사이클  
슬립 Monitoring Value

이렇게 사이클 슬립 발생 빈도가 높아짐에 따라 하프 사이클 단위의 슬립 역시 발생 빈도가 높아지게 되며 Figure 3-2와 같이 하프 사이클 슬립이 발생하는 것을 확인 할 수 있다.

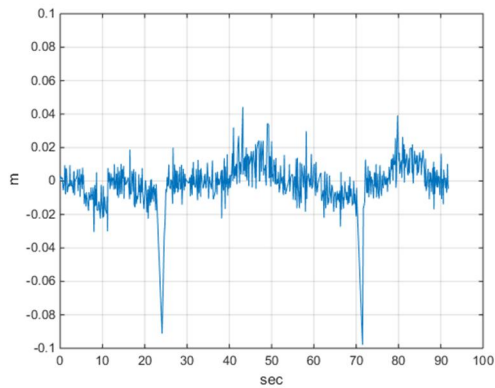


Figure 3-2 하프 사이클 슬립이 발생한  $\nabla\Delta\nabla_t\phi$  그래프

이렇게 하프 사이클 단위의 슬립이 발생하게 되면 Figure 3-3과 같은 위치오차를 유발하므로 정확한 항법을 위해서는 하프 사이클 단위의 슬립까지 검출 및 보상해 주는 것이 필요하다.

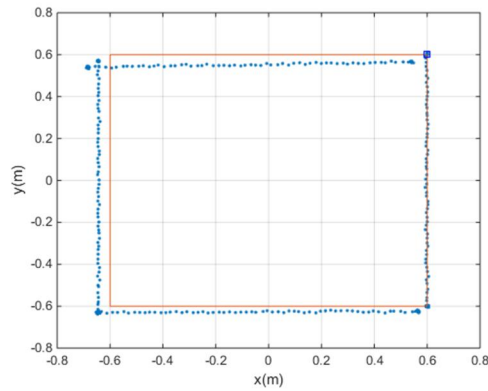


Figure 3-3 하프 사이클 슬립에 의한 위치오차

## 제 2 절      사이클 슬립 검출 알고리즘

IMU와의 결합을 통해 사이클 슬립을 검출하는 방식은 기본적으로 동적상황에서도 사이클 슬립 검출을 가능하게 하는 것이 목적이다. 동적상황에서 carrier phase 측정치에 존재하는 distance 변화량 항을 IMU 결합항법 위치 추정 결과를 이용하여 제거해 줄 수 있기 때문이다. 자세한 설명은 아래와 같다.

2장 1절에서 언급한 것과 같이 실내환경에서의 Carrier phase오차 요소는 식(2.1)과 같다. 이를 이용하여 동적상황에서

측정된 carrier phase를 이중차분 한 뒤 epoch간 차분을 하면 식(3.1)과 같다. 동적상황이기 때문에 우변에는 d(distance)의 변화량 항이 남아있게 되며 바로 이 항의 존재가 사이클 슬립 검출을 어렵게 만든다.

$${}^i\nabla^j{}_r\Delta_u\nabla_t\phi=\nabla\Delta\nabla_t(d+N\lambda+\varepsilon) \quad (3.1)$$

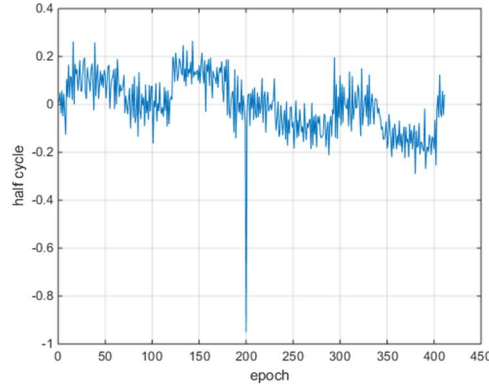


Figure 3-4 Distance 변화량 항이 존재하는  $\nabla\Delta\nabla_t\phi$  그래프

그렇기 때문에 이 d 항을 제거해 줘야 사이클 슬립 검출이 가능하게 된다. 앞서 언급했듯이 본 연구에서는 이를 제거 하기 위해 IMU 결합을 통한 사이클 슬립 검출 방식을 사용하였다. IMU와의 결합을 통해 추정한 위치결과를 이용하여 d 변화량 데이터를 만들었고 그 수식과 그래프는 각각 식(3.2), Figure 3-5과 같다.

$$\hat{d}_u^i = |r^i - \hat{r}_u|$$

$${}^i\nabla_r^j \Delta_u \nabla_t(\hat{d}_u^i) = {}^i\nabla_r^j \Delta_u \nabla_t(d + \delta d) \quad (3.2)$$

$\hat{r}_u$  : 결합항법 위치추정결과  
 $\delta d$  : 결합항법 distance추정오차

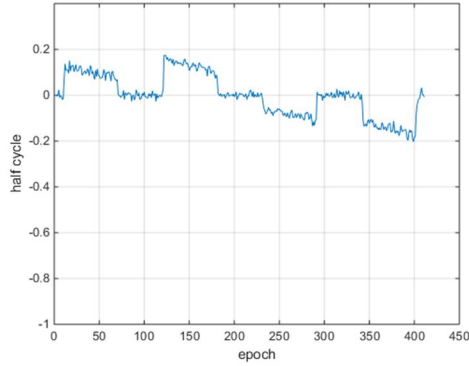


Figure 3-5 결합항법을 통해 추정한 distance 변화량

그리고 그 데이터를 이중차분, epoch간 차분 된 carrier phase에서 빼 줌으로써 사이클 슬립을 검출할 수 있는 monitoring value를 얻게 된다.

$${}^i\nabla_r^j \Delta_u \nabla_t(d + N\lambda + \varepsilon) - {}^i\nabla_r^j \Delta_u \nabla_t(d + \delta d)$$

$$= {}^i\nabla_r^j \Delta_u \nabla_t(N\lambda + \varepsilon - \delta d) \square \text{Monitoring Value}(m) \quad (3.3)$$

그리고 본 연구에서는 하프 사이클 단위의 슬립을 검출하는 것이 목표이므로 알아보기 편하도록  $\lambda/2$  로 나누어 주었다.



$$\frac{{}^i\nabla_r^j\Delta_u\nabla_t(N\lambda+\varepsilon-\delta d)}{\lambda/2}\square Monitoring Value(half cycle) \quad (3.4)$$

이렇게 d 항이 제거된 monitoring value 그래프는 Figure 3-6과 같다.

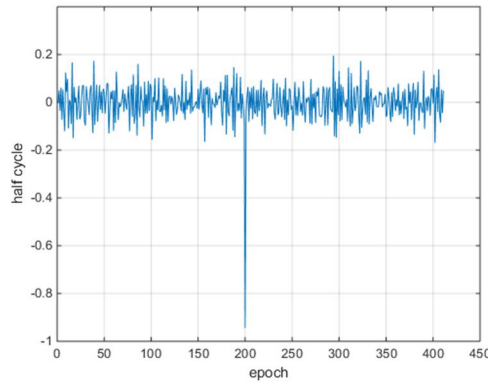


Figure 3-6 Distance 항이 제거된 Monitoring Value

### 제 3 절 하프 사이클 슬립의 검출 확률

하프 사이클 슬립이 확률적으로 검출 가능한지 확인해 본다. 동적상황에 대한 monitoring value 실시간 계산 결과를 로깅한 그래프가 Figure 3-7과 같다. 사이클 슬립이 발생하지 않은 경우이므로 잔여오차만 남아있는 상태이며 이를 수식으로 쓰면 식(3.5)와 같다.

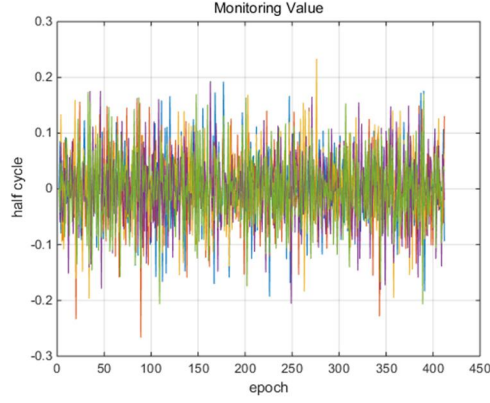


Figure 3-7 동적상황 실시간 Monitoring Value

$$\frac{{}^i\nabla_r^j\Delta_u\nabla_t(\varepsilon-\delta d)}{\lambda/2} \square \text{Monitoring Value}(\text{half cycle}) \quad (3.5)$$

여기서 단순히 잔여오차를 Gaussian 분포로 가정하여 Figure 3-7 데이터의  $1\sigma$  를 계산해 보면  $1\sigma_{MV} = 0.07 \text{ half cycle}$  이다. 그리고 이를 이용하여 잔여오차와  $\pm 1 \text{ half cycle}$  슬립에 대한 확률분포를 그려보면 Figure 3-8과 같으며 threshold는  $0.5 \text{ half cycle}$  로 설정하였다.

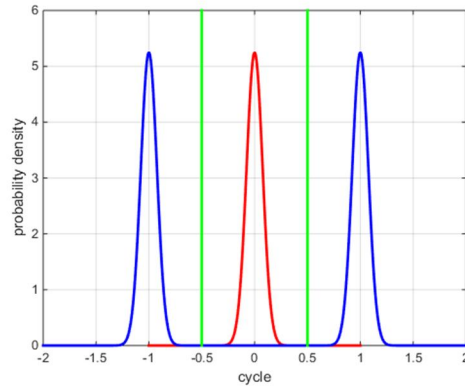


Figure 3-8 Monitoring Value 잔여오차,  $\pm 1$  half cycle 슬립에 대한 확률분포

이제 하프 사이클 슬립의 검출 확률을 알아보기 위해 miss detection과 false alarm 확률을 계산해 본다. Miss detection 확률은 사이클 슬립이 발생하였지만 검출하지 못할 확률을 말하며 계산 식은 식(3.6)과 같다.

$$P_{MD} = 2 \int_{-\infty}^{threshold} f(x | 1, \sigma_{MV}^2) dcycle \quad (3.6)$$

False alarm 확률은 사이클 슬립이 발생하지 않았는데 발생한 것으로 잘못 검출될 확률을 말하며 계산식은 식(3.7)과 같다.

$$P_{FA} = 2 \int_{threshold}^{\infty} f(x | 0, \sigma_{MV}^2) dcycle \quad (3.7)$$

Figure 3-8의 0.5 half cycle 부분을 확대하여 보면 Figure 3-9와 같고 그래프에 표시된 면적이 각각 miss detection과 false alarm의 확률을 나타낸다.

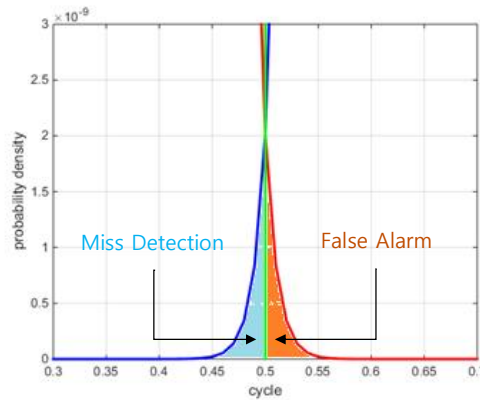


Figure 3-9 확률분포 0.5 half cycle 부분 확대 그래프

사이클 슬립의 검출 확률이 높아지기 위해서는 이 miss detection과 false alarm 확률이 작을수록 좋으며 Figure 3-7의 데이터를 이용하여 계산하여 보면 각각  $10^{-8}$  수준으로 굉장히 작은 것을 확인하였다. 즉 굉장히 높은 확률로 하프 사이클 슬립 검출이 가능함을 확인하였다.

#### 제 4 절 Monitoring Value 잔여오차 분석

3절의 검출 확률 계산 결과는 몇가지 가정이 성립할 때에만

유효하다. Monitoring value 잔여오차는 식(3.5)에서도 볼 수 있듯이 carrier phase 연산결과 항과 결합항법에 의한 distance 추정 결과 항의 차이기 때문에 이 두 항에 영향을 받는다. 그리고 그 두 항에 오차가 증가하게 되면 그 영향은 monitoring value에 그대로 나타나기 때문에 하프 사이클 슬립 검출을 위해서는 이 두 항이 항상 일정한 오차 수준을 유지해야만 한다. 그런데 어쩔 수 없는 몇몇 상황들은 오차를 증가시켜 false alarm을 발생시킨다. 결국 그러한 몇가지 경우들을 제거한 상태라는 가정이 필요한 것이다. 이제 4절에서 그 오차를 발생시키는 경우들과 필요한 가정들에 대해 알아본다

## 1. Carrier Phase 측정치에 발생하는 오차

먼저 carrier phase 측정치에 발생하는 오차들에 대해 알아보자. 실내환경에서 carrier phase 측정치에 영향을 줄 수 있는 요소로는 SNR과 멀티패스를 생각할 수 있다. SNR이 좋지 않으면 noise 수준이 증가하며 멀티패스오차가 발생하면 noise 수준의 증가뿐만 아니라 bias 오차까지 발생하게 된다. 이렇게 carrier phase 측정치에 오차가 발생하게 되면 그 오차가 monitoring value에도 고스란히 나타나며 이는 false alarm을 발생시키게 된다. SNR의 경우는 SNR 측정치를 이용해 SNR이 갑자기 안좋아지는 경우를 검출하여 그 위성의 데이터를 사용하지 않는 것으로 해결할 수 있지만 멀티패스오차의 경우는 현재로써는 해결이 어려운 것이

사실이다. 그렇기 때문에 첫번째로 멀티패스오차를 발생시키는 상황을 만들지 않아야 한다는 가정이 필요하게 된다.

## 2. 결합항법으로 추정된 Distance 항에 포함되는 오차

다음은 결합항법에서 추정된 distance 항에 포함될 수 있는 오차에 대해 알아본다.

$$\begin{aligned} \text{Monitoring Value} &= {}^i\nabla_r^j \Delta_u \nabla_t (\varepsilon - \delta d) \\ \text{결합항법으로 추정된 distance 항} &= {}^i\nabla_r^j \Delta_u \nabla_t \delta d \end{aligned} \quad (3.8)$$

### ①측정치 epoch간 시간간격 증가에 의한 오차

첫번째는 의사위성 carrier phase 측정치의 epoch간 시간간격이 멀어져 그 시간 동안 진행되는 INS propagation의 오차가 증가하는 경우이다. 본 연구에서 사용한 의사위성은 0.1초 간격으로 측정치를 송신하도록 되어 있다. 하지만 실제로는 정확히 0.1~0.2초 간격으로 송신하며 통신 방식에 따라서는 측정치 epoch간 시간간격이 훨씬 더 멀어지기도 한다. 그래서 본 연구에서는 블루투스 등과 같이 불안정한 무선통신 대신 성능이 좋은 RF모뎀을 사용하였다. 하지만 그럼에도 불구하고 측정치 시간간격이 0.3초까지는 발생한다. 측정치 시간간격이 증가할수록 그 시간 동안 INS propagation만 수행되기 때문에 그만큼

propagation 오차가 증가하게 된다. 그러므로 시간간격 증가에 따라 오차가 어느 정도까지 증가하는 지 확인해 보아야 한다. Figure 3-10은 결합항법 시뮬레이션을 통해 시간간격에 따른 위치오차 수준 변화를 나타낸 그래프 이다. 그래프 초반에 시간간격을 0.1초에서 0.5초까지 5가지 경우를 삽입하였고 그에 따라  $3\sigma$  수준이 점차 증가하는 것을 볼 수 있다. 정확한 수치는 Table 3-1에 나타내었다.

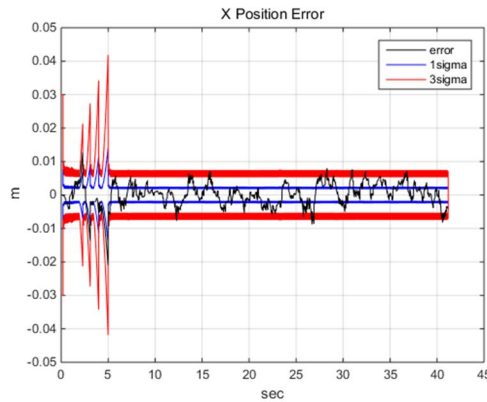


Figure 3-10 측정치 시간간격에 따른 위치오차 시뮬레이션

	0.1 초	0.2 초	0.3 초	0.4 초	0.5 초
$3\sigma$	7.5 mm	21.5 mm	27.4 mm	34.2 mm	41.9 mm

Table 3-1 측정치 시간간격에 따른 위치오차  $3\sigma$

RF 모델을 사용할 경우 시간간격이 0.3초까지 발생하므로 시간간격에 의해 발생할 수 있는 위치오차의  $3\sigma$ 는 27.4mm 수준인 것으로 확인하였다. 이 수치는 다행히 0.5 half cycle( $\approx 47.6\text{mm}$ ) 보다

충분히 작은 값이므로 false alarm을 발생시킬 확률은 낮기 때문에 특별히 추가적인 가정은 필요 없다.

## ②가속도계의 낮은 성능에 의한 오차

본 연구에서 사용한 가속도계는 성능이 좋지 않은 낮은 등급의 센서이다. 그렇기 때문에 갑작스런 움직임에 의해 큰 가속도가 발생하게 되면 가속도계 측정치에는 그만큼 큰 오차가 포함된다. 또한 오차가 아니더라도 이러한 impulse 형태의 측정치는 좋지 않다. 그런데 기존의 ‘KOBUKI’ 로봇의 움직임은 갑자기 출발하고 갑자기 정지하여 Figure 3-11과 같이 impulse 형태로 순간적인 큰 가속도를 발생시켰다.

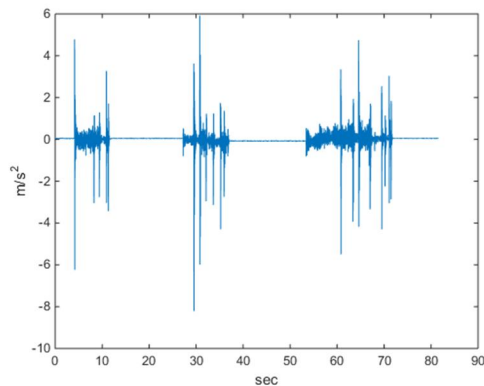


Figure 3-11 기존 ‘KOBUKI’ 로봇의 Impulse 형태의 가속도

이러한 가속도 데이터를 이용하여 적분 된 속도는 큰 오차를



가지고 있었고 이는 역시 적분 되어 순간적으로 큰 위치오차를 발생시켰다. 그리고 역시 이 위치오차는 고스란히 monitoring value에 나타나 false alarm을 발생시키게 된다. 그렇기 때문에 이를 방지하기 위해서는 ‘KOBUKI’ 로봇의 움직임 속도를 천천히 증가시키고 천천히 감소시켜 부드럽게 움직여야 한다는 두번째 가정이 필요하게 된다. 움직임을 부드럽게 바꾼 결과 Figure 3-12과 같이 impulse 형태의 측정치가 모두 사라진 것을 확인할 수 있다.

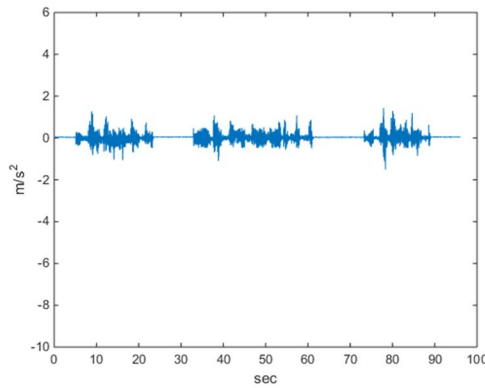


Figure 3-12 움직임을 부드럽게 한 후의 가속도 데이터

③오차범위 내에서의 epoch간 위치 차에 따른 오차

$${}^i\nabla_r^j\Delta_u\nabla_t\delta d = ({}^i\nabla_r^j\Delta_u\delta d)_{k+1} - ({}^i\nabla_r^j\Delta_u\delta d)_k \quad (3.9)$$

식(3.9)를 보면 distance 추정오차 항이 epoch간 차분 된 것을 알 수 있다. 여기서 주목할 부분은 실제 distance가 아닌 distance 추정오차 간의 차분이라는 점이다. 즉 각 epoch에서의 실제 distance가 얼마인지와는 관계없이 distance 추정오차의 크기에만 영향을 받는다는 것이다. k epoch과 k+1 epoch의 distance 오차의 크기가 비슷하다면 monitoring value의 잔여오차는 작아질 것이고 distance 오차가 차이가 크다면 monitoring value의 잔여오차도 커질 것이다. 여기서 Distance는 사용자 위치와 위성간의 거리 이고 위성의 위치는 고정되어 있으므로 distance는 사용자의 위치 추정 결과에 따라서만 변하게 된다. 결국 monitoring value 잔여오차는 사용자 위치 추정오차범위 내에서의 epoch간 위치 차이에 따라 달라지게 된다. 이를 표현한 그림이 Figure 3-13과 같다. 앞서 distance로 설명했듯이 위치에서도 역시 각 epoch의 실제 위치와는 관계가 없다.

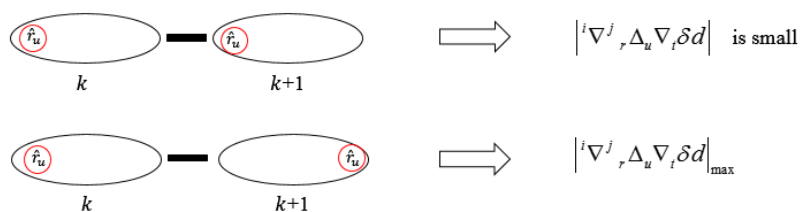


Figure 3-13 Epoch간 사용자 위치 추정오차에 따른 Monitoring value 잔여오차

하지만 이 경우에 사용자가 오차범위 내에서 어느 위치에 존재하느냐는 인위적으로 선택할 수 있는 문제가 아니기 때문에 제한하거나 조절할 수가 없다. 그래서 Monte Carlo 시뮬레이션을 통해 오차범위 내에서 랜덤 한 위치들의 epoch간 차분을 수행함으로써 오차를 확인해 보아야한다. 그렇지만 이 역시도 차분하는 두 위성에 대한 사용자의 위치에 따라 monitoring value 잔여오차 크기가 달라지기 때문에 이 경우 하나에 대한 오차 만을 분석할 수는 없다. 즉 다음 오차원인으로 설명할 차분하는 두 위성에 대한 사용자 위치에 따른 오차 문제와 함께 Monte Carlo 시뮬레이션을 수행하여 최대 오차 수준을 알아볼 것이다.

#### ④차분하는 두 위성에 대한 사용자의 위치에 따른 오차

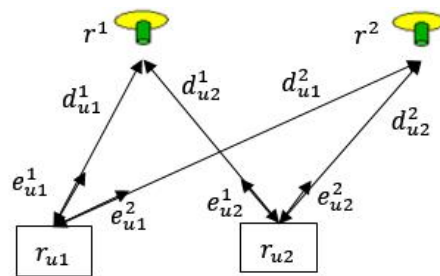


Figure 3-14 사용자 위치에 따른 시선벡터의 위성간 차분

Figure 3-14를 보면 두 위성에 대한 사용자들의 상대 위치에

따라 각 위성으로 향하는 시선벡터의 위성간 차분의 크기가 달라지는 것을 알 수 있다. 수식으로는 식(3.10)와 같다.

$$\left|e_{u1}^1 - e_{u1}^2\right| < \left|e_{u2}^1 - e_{u2}^2\right| \quad (3.10)$$

그리고 monitoring value의 계산에는 distance의 이중차분이 수행되므로 위성간 차분은 항상 계산되며 이는 오차 항 간의 계산에서도 마찬가지로 임을 식(3.8)을 보면 알 수 있다. 또한 오차원인(3)에서도 언급했듯이 distance 추정오차는 사용자 위치 추정오차에만 영향을 받으며 추정위치로부터는 시선벡터를 구할 수 있다. 즉 distance의 위성간 차분의 크기는 시선벡터의 위성간 차분 크기와 비례한다. 그렇기 때문에 위성간 차분의 크기가 작아야 distance의 위성간 차분의 크기도 작으며 monitoring value 잔여오차의 크기도 작아진다.

$$\left|e_{u1}^1 - e_{u1}^2\right|_{\min} \rightarrow \left|^i \nabla^j_r \Delta_u \nabla_t \delta d\right|_{\min} \rightarrow \left|^i \nabla^j_r \Delta_u \nabla_t (\varepsilon - \delta d)\right|_{\min} \quad (3.11)$$

위 문단의 결과에 의해 오차를 최대로 하는 경우가 시선벡터의 위성간 차분 크기가 최대가 되는 경우임을 알았다. 그리고 시선벡터의 위성간 차분 크기가 최대가 되는 경우는 시선벡터 사이의 각도가 가장 크게 벌어지는 경우로써 사용자가 두 위성의 정 가운데 수직 아래에 위치할 때 임을 쉽게 알 수 있다.

이를 확인해보기 위해 임의의 두 위성에 대한  ${}^i\nabla_r^j\Delta_u\nabla_t\delta d$  값을 의사위성이 설치된 실내의 모든 좌표에 대하여 계산해 보았다. 사용자 위치오차 수준은 오차원인 (1)에서 계산한  $3\sigma = 27.4mm$  를 사용하였고 결과는 Figure 3-15와 같다.

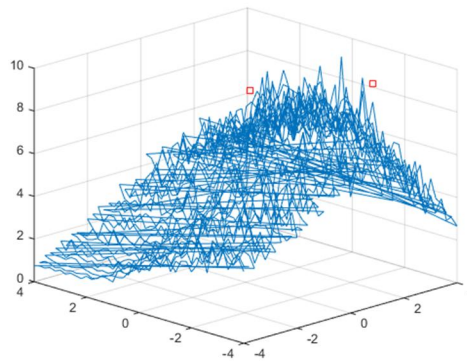


Figure 3-15 임의의 두 위성에 대한 위치에 따른  ${}^i\nabla_r^j\Delta_u\nabla_t\delta d$

두개의 사각형이 임의의 두 위성을 나타낸다. X축, Y축 각각 8m 범위의 좌표에 대해 시뮬레이션 한 결과이며 Z축 스케일은 실제  ${}^i\nabla_r^j\Delta_u\nabla_t\delta d$  의 크기가 아니고 오차의 차이를 보여주기 위해 적당한 값을 곱한 결과이다. 그래프를 보면 위에서 언급했듯이 두 위성의 중간 부분이 가장 오차가 크며 멀어질수록 오차가 작아지는 것을 확인할 수 있다.

이에 더하여 앞서 오차원인(3)에서 언급했던 오차범위내의 랜덤한 위치들에 대한 Monte Carlo 시뮬레이션까지 추가하여

${}^i\nabla^j_r\Delta_u\nabla_i\delta d$  의 최대 오차 값을 구하여 보았다. 그 결과는  $54.1\text{mm} = 0.568 \text{ half cycle}$  로  $0.5 \text{ half cycle}$  보다 큰 값이다. 즉 두 위성의 정 중앙에 사용자가 위치함과 동시에 오차범위내 앞 뒤 두 epoch간 위치가 가장 멀게 되는 순간 monitoring value는  $0.5 \text{ half cycle}$  을 넘어 false alarm을 발생시키게 된다. 물론 이 값은 최대값으로 이 경우가 발생할 확률은 굉장히 낮다. 앞 뒤 두 epoch간 오차범위내 위치가 서로 가장 먼 반대쪽에 찍힐 확률과 사용자 위치오차의  $3\sigma$  수준의 확률이 연속으로 발생해야 가능한 수치이다. 또한 실제로 실험에서는 의사위성 신호가 양호한 원점 주위의 반경 1m 정도 지역에서만 실험을 진행하므로 차분하는 위성들의 정 중앙 근처로는 가지 않는다. 위성 차분은 정 중앙에 있는 위성과 둘러싼 나머지 위성 간에 수행한다.

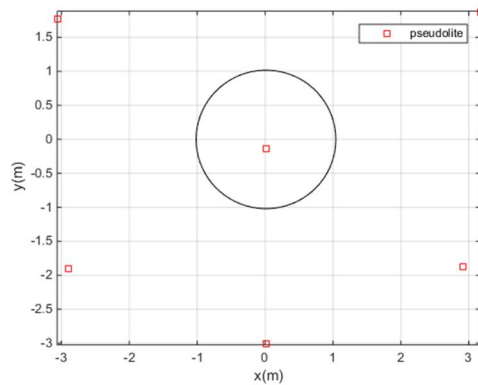


Figure 3-16 위성 배치와 사용자의 활동 반경

오차원인(3)에 대해서는 임의로 제한할 수 있는 부분이 없기도 하고 발생할 확률도 낮으며 사용자 위치가 차분하는 두 위성 중앙에 있지만 않으면 false alarm을 발생시키는 수준이 아니기 때문에 딱히 가정은 필요 없다. 하지만 오차원인(4)에 대해서는 발생확률이  $3\sigma$  수준이기는 하지만 혹시라도 충분히 false alarm이 발생할 수도 있다고 판단하여 차분하는 두 위성의 정 중앙에는 사용자가 가지 않는 것을 세번째로 가정하였다.

## 제 5 절 사이클 슬립 보상 알고리즘

Monitoring value가 threshold를 넘어 사이클 슬립이 검출되면 얼마만큼의 사이클이 변했는지를 계산하여 그만큼을 다시 보상해주는 것이다. 이를 수식으로 표현하면 식(3.12)와 같다.

$$\begin{aligned}
 {}^i\nabla_r^j \Delta_u \phi_{before} &= {}^i\nabla_r^j \Delta_u (d + N\lambda + \varepsilon) \\
 \text{If } \text{Monitoring Value} > \text{threshold} &= 0.5 \text{ half cycle} \\
 N &= 0.5 \text{round}(\text{Monitoring Value}) \\
 {}^i\nabla_r^j \Delta_u \phi_{before} - N \lambda &= {}^i\nabla_r^j \Delta_u \phi_{after}
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

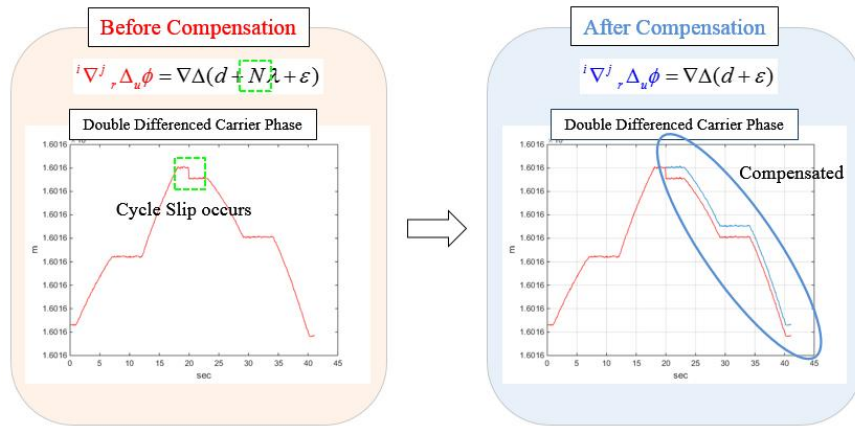


Figure 3-17 사이클 슬립 보상 전과 후

Figure 3-17을 보면 좌측의 사이클 슬립 보상 전 이중차분 carrier phase에 발생했던 슬립이 우측에 다시 보상된 모습을 확인할 수 있다.



## 제 4 장 실시간 항법 구성 및 결과

4장에서는 3장의 이론을 토대로 ‘KOBUKI’ 로봇을 이용하여 실시간 실내 항법을 구현한 것에 대한 설명이다.

### 제 1 절 실시간 항법 구성

#### 1. 전체 장비 구성

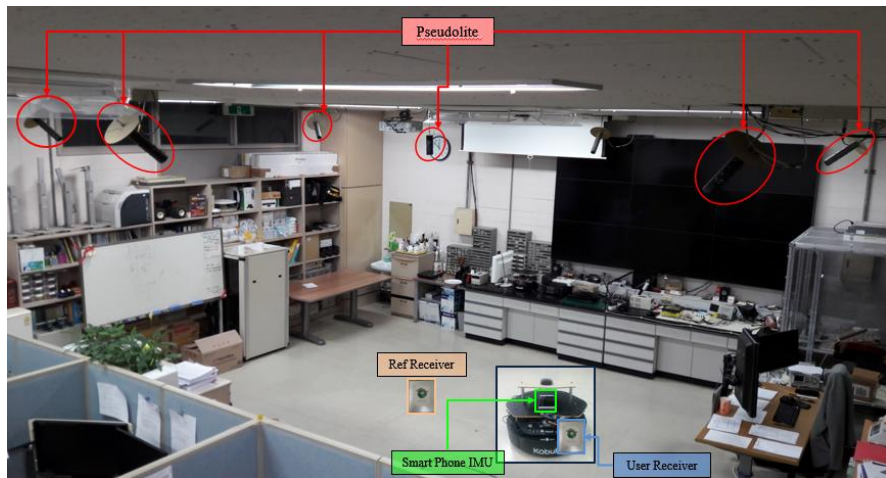


Figure 4-1 실내 실험 환경

Figure 4-1의 공간에서 실험을 수행하였으며 천장에 총 6기의 의사위성이 장착되어 있다. 기준국 수신 안테나는 원점에 두었고 스마트폰과 사용자 수신기, RF 모델은 ‘KOBUKI’ 로봇에 실려

있다. 또한 모든 항법 계산을 수행하고 제어 명령을 생성하여 전송할 노트북이 있다.

## 2. 시리얼 통신 구성

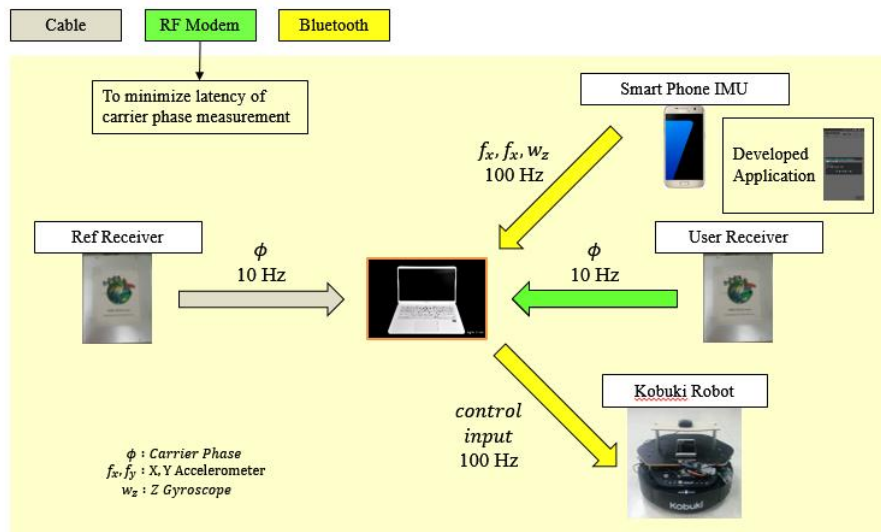


Figure 4-2 시리얼 통신 구성

시리얼 통신은 Figure 4-2와 같이 구성되어 있다. 기준국 수신기는 고정되어 움직이지 않으므로 유선을 통해 노트북에 10 Hz로 측정치를 전송한다. 사용자 수신기 역시 10Hz로 측정치를 전송하는데 처음에는 블루투스로 데이터를 전송하였으나 블루투스는 통신이 불안정하여 데이터 손실이 많아 Figure 4-3과 같이 문제가 있었다.

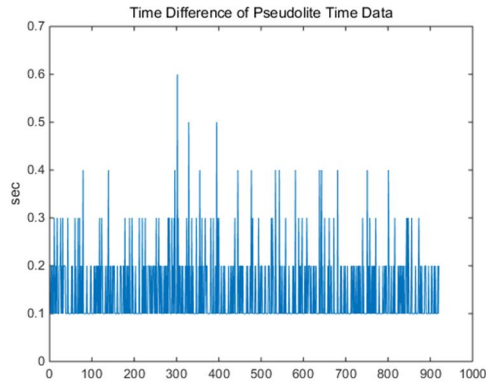


Figure 4-3 블루투스 전송된 데이터의 시간간격

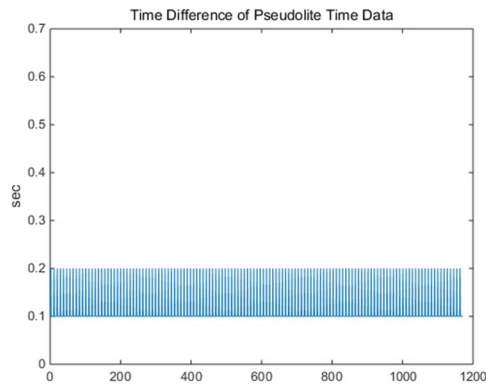


Figure 4-4 유선으로 전송된 데이터의 시간간격

이렇게 의사위성 데이터에 손실이 발생하면 손실되는 동안의 carrier phase 측정치가 없는 것이므로 그 시간 동안에는 INS propagation만 수행되게 된다. 그런데 IMU 센서가 성능이 좋지 않으므로 INS propagation 시간이 조금만 길어져도 propagation 오차가 증가하여 위치오차와 사이클 슬립 monitoring value

잔여오차를 증가시킨다. 이를 해결하기 위해 블루투스 대신 통신 성능이 더 좋은 RF모뎀으로 통신 장비를 바꾸었다. 그 결과 Figure 4-5와 같이 데이터 손실이 확 줄어들었다.

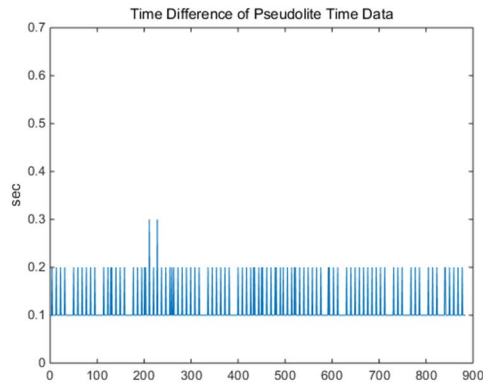


Figure 4-5 RF모뎀으로 전송된 데이터의 시간간격

스마트 폰의 경우 스마트폰에 내장된 블루투스를 통해 노트북으로 IMU 데이터를 100Hz로 전송한다. 스마트 폰에서 송신을 하기 위해서는 안드로이드 어플리케이션이 필요한데 센서 데이터의 블루투스 전송이 가능한 상용 어플리케이션이 없어 Figure 4-6과 같이 어플리케이션을 직접 제작하여 사용하였다.

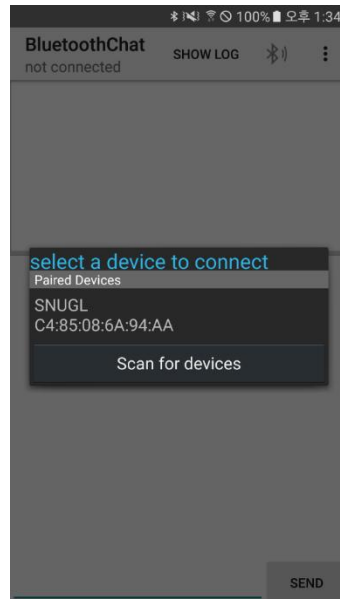


Figure 4-6 직접 제작한 스마트폰 센서 데이터 전송 어플리케이션

거북이로 보내는 제어 명령은 노트북에 내장된 블루투스  
거북이에 부착한 블루투스 기기를 사용하여 100Hz로 송신 한다.

### 3. 실시간 항법 프로그램

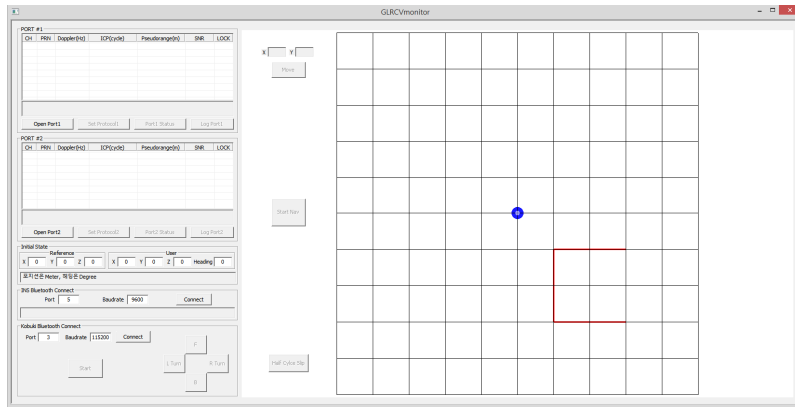


Figure 4-7 실시간 항법 프로그램

의사위성/IMU 결합항법의 실시간 계산과 위치결과 출력, 로깅, 제어명령, 조종, 영상 등을 수행하는 프로그램을 제작하였다.

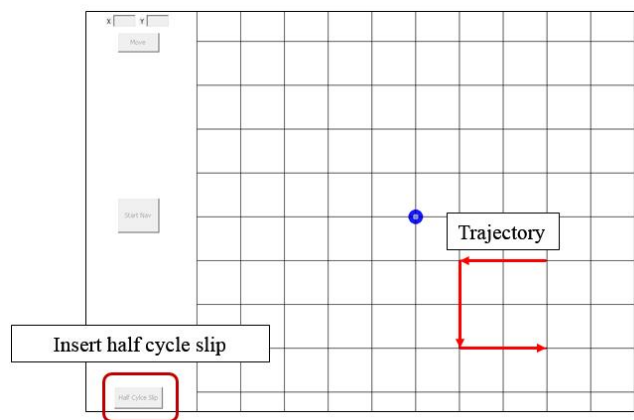


Figure 4-8 실시간 하프 사이클 슬립 발생기

실시간으로 하프 사이클 슬립에 대한 검출 및 보상을 확인하기

위하여 하프 사이클 슬립을 원하는 순간에 발생시킬 수 있도록 발생 버튼을 만들었으며 이를 이용하여 실시간 영상과 함께 하프 사이클 슬립에 대한 검출 및 보상 데모를 수행하였다.

## 제 2 절      결과

### 1. 실시간 항법 결과

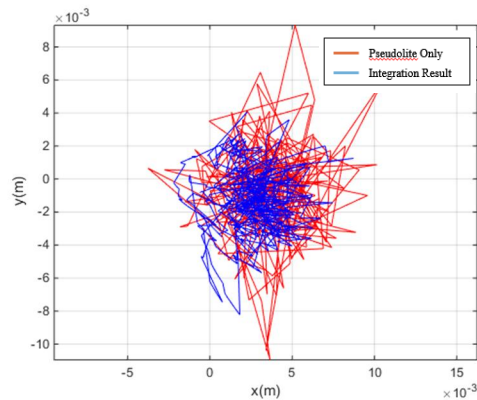


Figure 4-9 의사위성 단독과 결항항법 결과의 정적상황 위치오차 비교

	Pseudolite Only $1\sigma$	Pseudolite/IMU $1\sigma$
X	2.9 mm	1.9 mm
Y	2.5 mm	1.7 mm

Table 4-1 의사위성 단독과 결항항법 결과의 정적상황 위치오차 비교

Figure 4-9을 보면 의사위성 단독 위치결과에 비해 결합항법의 위치결과가 더 정밀한 것을 확인 할 수 있다. Table 4-1에 위치오차  $1\sigma$  값들을 나타냈으며 결합항법이 의사위성 단독에 비해 약 30%정도 오차수준이 개선을 것을 확인할 수 있다.

또한 동적상황에 대하여 Covariance 오차 바운드를 그린 그래프가 Figure 4-10, Figure 4-11에 나타나 있다.

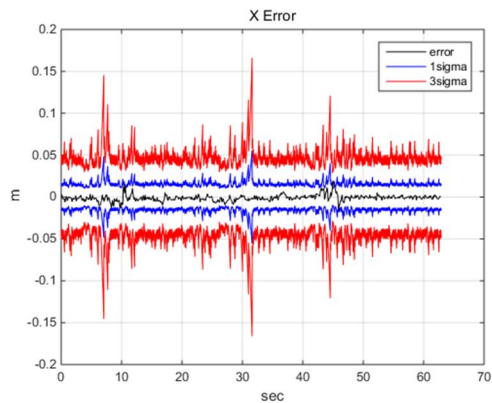


Figure 4-10 동적상황 X축 위치오차



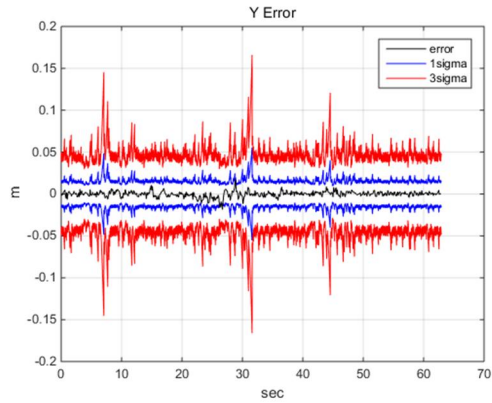


Figure 4-11 동적상황 Y축 위치오차

동적상황에서 X축, Y축 모두  $1\sigma$  안에 잘 바운드되고 있음을 확인하였다.

## 2. 하프 사이클 슬립 검출 및 보상 결과

앞서 4-1절에서 언급했던 하프 사이클 슬립 발생기를 이용하여 동적상황에서 총 2회 하프 사이클 슬립을 발생시켰고 그에 대한 flag가 Figure 4-12에 나타나 있다.

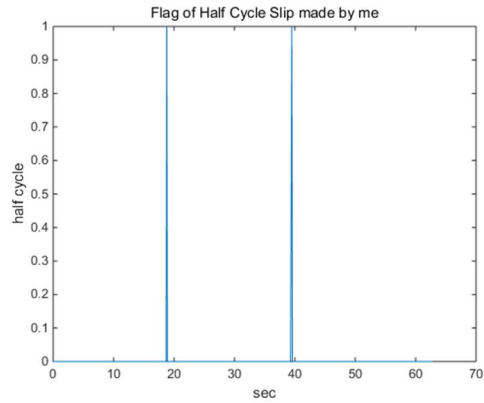


Figure 4-12 하프 사이클 슬립 발생 Flag

그리고 실제로 monitoring value에 검출된 사이클 슬립을 Figure 4-13에서 확인 할 수 있다.

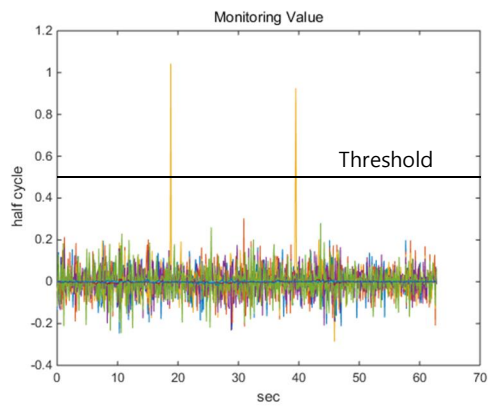


Figure 4-13 Monitoring Value

이에 대해 하프 사이클 슬립을 보상하지 않아 오차가 발생한 궤적과 보상을 하여 오차가 발생하지 않은 궤적의 비교가 Figure

4-14에 나타나 있다.

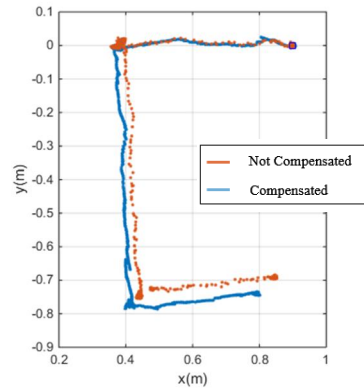


Figure 4-14 하프 사이클 슬립이 보상된 궤적과 보상되지 않은 궤적 비교

Figure 4-15의 경우 실시간 영상을 캡처한 사진이며 주행하는 동안 하프 사이클 슬립을 발생시키고 보상은 해주지 않아 계속해서 위치오차가 발생하는 모습이다.

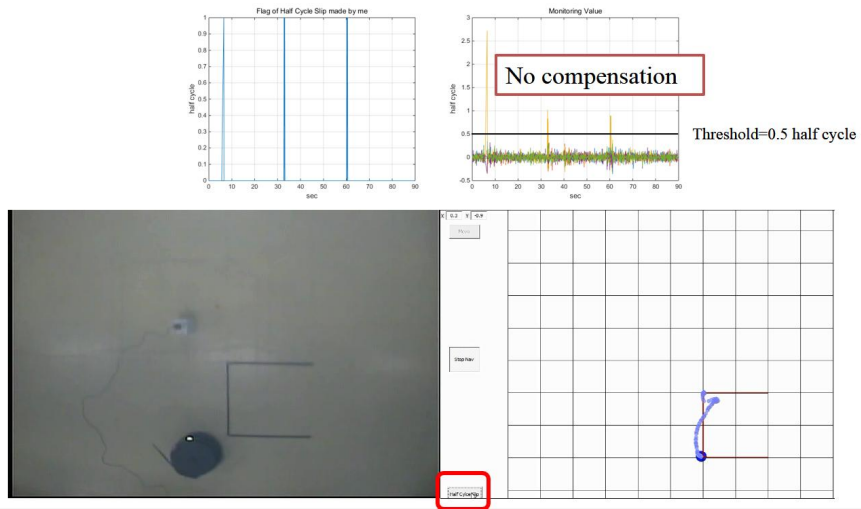


Figure 4-15 하프 사이클 슬립을 보상해 주지 않고 있는 실시간 영상

Figure 4-16 역시 실시간 영상을 캡처한 사진이며 주행하는 동안 하프 사이클 슬립을 계속 발생시키지만 이번엔 모두 보상해 주어 슬립에 의한 위치오차 없이 잘 주행하고 있는 모습이다.

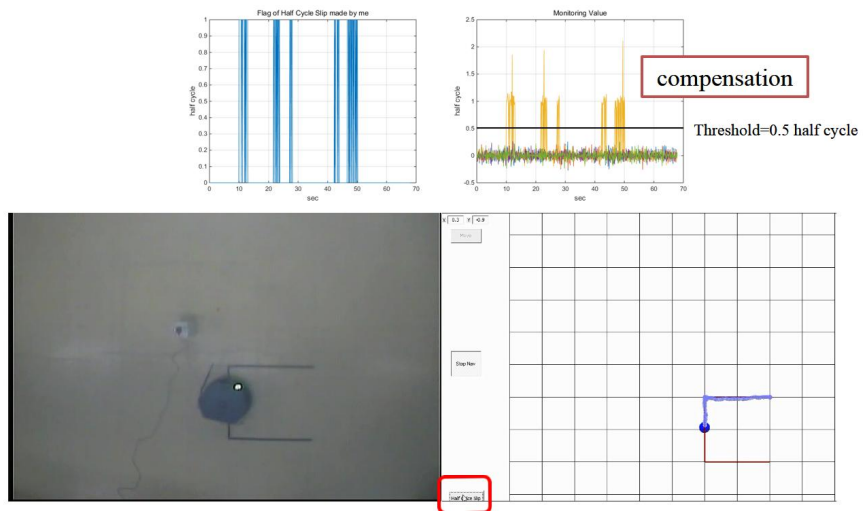


Figure 4-16 하프 사이클 슬립을 보상해주고 있는 실시간 영상

## 제 5 장 결론

본 논문에서는 기존의 의사위성/IMU 결합을 통한 실내 항법 연구에서 해결되지 않고 남아있던 사이클 슬립 발생 문제를 해결하기 위한 연구를 진행하였다. 또한 기존의 실외 GPS/IMU 결합을 통한 사이클 슬립 검출 및 보상에 대한 연구를 사이클 슬립 발생이 더욱 심한 실내 환경에 적용하여 하프 사이클 단위의 슬립까지 검출 및 보상 할 수 있도록 하는 연구를 진행 하였다.

먼저 스마트 폰에 내장된 초저가 IMU 센서를 EKF 를 이용한 의사위성/IMU 결합에 사용하기 위하여 센서 모델링을 수행하였다. 또한 센서가 수평상태를 유지할 때 자이로스코프와 가속도계에 이상 현상이 발생하였으나 다행히 이를 잘 해결하여 실시간으로도 문제없이 항법을 수행할 수 있었다. 그리고는 우선 시뮬레이션을 통해 필터 결합을 수행하였으며 그 뒤에 실시간 항법을 수행하여 시뮬레이션 결과와 비교하는 것으로 EKF 결합을 완료하였다. 그 결과 의사위성 단독 대비 위치 정확도가 30% 정도 향상된 것을 확인하였다.

그리고는 이 논문의 주제인 하프 사이클 슬립 검출을 위해 알고리즘을 추가하였다. 하프 사이클 단위의 슬립까지 검출하기 위해서는 모니터링 값의 잔여오차를 줄여야 했다. 이를 위해 먼저 사용자 수신기 데이터를 데이터 손실이 많은 블루투스 대신 데이터 손실이 적은 RF 모뎀을 이용하여 수신하는 것으로 변경하였다. 의사위성 데이터에 손실이 생기면 그동안 INS propagation만 수행

되어 propagation 오차가 증가하기 때문이다. 두번째는 가속도계 측정치 오차에 의한 영향을 줄이기 위해 실험에 사용한 로봇의 기동을 부드럽게 움직이도록 제어해 주었다. 가속도계의 성능이 좋지 않아 로봇의 급격한 움직임 변화들에 대해서는 큰 오차를 발생시키기 때문이다. 또한 추가적으로 오차가 발생할 수 있는 세가지 경우가 존재하는데 그러한 경우들을 발생시키지 않는다는 가정을 해주었다. 이렇게 잔여오차를 줄인 뒤 잔여오차의 수준을 가우시안으로 가정하여 miss detection 확률과 false alarm 확률을 계산한 결과  $10^{-8}$  수준으로 계산되어 높은 확률로 하프 사이클 슬립을 검출 할 수 있다는 것을 확인하였다.

이후 지금까지 진행한 모든 알고리즘을 실시간으로 수행할 수 있는 MFC 프로그램을 제작하였다. 그리고 실제로 스마트폰과 사용자 수신기를 장착하여 움직이게 될 거북이라는 로봇을 목표 위치로 자동 주행할 수 있도록 알고리즘을 추가하였다. 각각의 장비들은 블루투스나 RF모뎀 그리고 유선을 통해 시리얼 통신으로 데이터를 주고 받는다. 이렇게 실시간 실내 항법을 구성하였으며 하프 사이클 슬립 검출과 보상을 잘 수행하며 항법이 잘 유지되는 것을 확인하였다.

## 참고 문헌

- [1] 김연실, "저가 INS 를 활용한 단일 주파수 GNSS 수신기의 사이클 슬립 검출에 관한 연구 / 김연실," A study on cycle slip detection of single frequency GNSS receiver using low cost INS, 서울 : 서울대학교 대학원, 서울, 2016.
- [2] 윤두희, "GPS 의사위성을 이용한 항법 시스템에 관한 연구 = (A)Study on GPS pseudolite navigation system / 윤두희," 서울 : 서울대학교 대학원, 서울, 2003.
- [3] Lee. T, "Pedestrian Indoor Navigation Algorithm based on the Pseudolite and Low-cost IMU with Magnetometers including In-Flight Calibration" , 2010
- [4] Takasu, Tomoil, Yasuda & Akio, "Cycle Slip Detection and Fixing by MEMS-IMU/GPS Integration for Mobile Environment RTK-GPS," Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008), 2008 Savannah, GA, 64-71, September 2008.
- [5] C. Kee, D. Yun, and H. Jun, "Precise calibration method of pseudolite positions in indoor navigation systems," Computers & Mathematics with Applications, vol. 46, pp. 1711-1724, 2003.
- [6] J. Farrell, T. D. Givargis, and M. J. Barth, "Real-time differential carrier phase GPS-aided INS," Control Systems Technology, IEEE Transactions on, vol. 8, pp. 709-721, 2000.
- [7] J. Wendel, O. Meister, R. Monikes, and G. F. Trommer,



- "Time Differenced carrier phase measurements for tightly coupled GPS/INS integration," in Proceedings of IEEE/ION PLANS 2006, 2001, pp. 54–60.
- [8] J. A. Farrell, H.-S. Tan, and Y. Yang, "Carrier phase GPS-aided INS-based vehicle lateral control," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 125, pp. 339–353, 2003.
- [9] Y. Yang and J. Farrell, "Magnetometer and differential carrier phase GPS-aided INS for advanced vehicle control," *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, vol. 19, pp. 269–282, 2003.
- [10] B. K. Soon, S. Scheduling, H.-K. Lee, H.-K. Lee, and H. Durrant-Whyte, "An approach to aid INS using time-differenced GPS carrier phase (TDCP) measurements," *Gps Solutions*, vol. 12, pp. 261–271, 2008.
- [11] G. Dissanayake, S. Sukkarieh, E. Nebot, and H. Durrant-Whyte, "The aiding of a low-cost strapdown inertial measurement unit using vehicle model constraints for land vehicle applications," *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, vol. 17, pp. 731–747, 2001.
- [12] E.-H. Shin and N. El-Sheimy, "Accuracy improvement of low cost INS/GPS for land applications: University of Calgary, Department of Geomatics Engineering, 2001.
- [13] J. Collin, G. Lachapelle, and J. Kappi, "MEMS-IMU for personal positioning in a vehicle—A gyro-free approach," in *GPS 2002 Conference (Session C3a)*, Portland, OR, Sept, 2002, pp. 24–27.

- [14] D. K. Yang, A. G. Xu, J. Ma, W. D. Xiao, C. L. Law, K. V. Ling, et al., "Low cost SINS/GPS integration for land vehicle navigation," in Intelligent Transportation Systems, 2002. Proceedings. The IEEE 5th International Conference on, 2002, pp. 910–913.
- [15] S. Godha, "Performance evaluation of low cost MEMS–based IMU integrated with GPS for land vehicle navigation application," UCGE report, 2006.
- [16] Y. Li, J. Wang, C. Rizos, P. Mumford, and W. Ding, "Low–cost tightly coupled GPS/INS integration based on a nonlinear Kalman filtering design," in Proceedings of ION National Technical Meeting, 2006, pp. 18–20.
- [17] I. Skog, "GNSS–aided INS for land vehicle positioning and navigation," 2007.
- [18] R. B. Langley, "RTK GPS," GPS World, vol. 9, pp. 70–76, 1998.
- [19] Altmayer, C., "Enhancing the Integrity of Integrated GPS/INS Systems by Cycle slip Detection and Correction," Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings of the IEEE, 174–179, 2000.
- [20] G. Navstar, "ICD–GPS–200," Revision C, Oct, vol. 10, 1993.
- [21] P. D. Groves, Principles of GNSS, inertial, and multisensory integrated navigation systems: Artech house, 2013.
- [22] W. Flenniken, "Modeling Inertial Measurement Units and

- Anlyzing the Effect of Their Errors in Navigation Applications," 2005.
- [23] N. Barbour and G. Schmidt, "Inertial sensor technology trends," *Sensors Journal*, IEEE, vol. 1, pp. 332–339, 2001.
- [24] P. Aggarwal, Z. Syed, X. Niu, and N. El–Sheimy, "Cost–effective testing and calibration of low cost MEMS sensors for integrated positioning, navigation and mapping systems," in *Proceedings of XIII FIG Conference*, 2006, pp. 8–13.
- [25] Song, J., Kim, Y., Park, B., Yun, H. & Kee, C., "Cycle Slip Detection Algorithm by Integrating Vehicle and Inertial Sensors for Land Vehicle Users," *Proceedings of the International Global Navigation Satellite Systems Society IGNSS Symposium*, Sydney, Australia, November 15–17, 2011.
- [26] I. Adin, J. Mendizabal, G. de Miguel, J. Goya, L. Zamora, and S. Arrizabalaga, "Complementary Positioning System in GNSS–denied Areas," *Transportation Research Procedia*, vol. 14, pp. 4562–4571, 2016.
- [27] X. Bin, Y. Sen, and Z. Xu, "Control of a quadrotor helicopter using the COMPASS (BeiDou) system and on–board vision system," *Optik – International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 127, pp. 6829–6838, 2016.
- [28] T.–Y. Seung, G.–C. Kwon, K.–S. Moon, S.–H. Lee, and

- K.-R. Kwon, "An Estimation Method for Location Coordinate of Object in Image Using Single Camera and GPS," *Journal of Korea Multimedia Society*, vol. 19, pp. 112–121, 2016.
- [29] Y. Shi, S. Ji, X. Shao, P. Yang, W. Wu, Z. Shi, et al., "Fusion of a panoramic camera and 2D laser scanner data for constrained bundle adjustment in GPS-denied environments," *Image and Vision Computing*, vol. 40, pp. 28–37, 2015.
- [30] X. Song, X. Li, W. Tang, and W. Zhang, "A fusion strategy for reliable vehicle positioning utilizing RFID and in-vehicle sensors," *Information Fusion*, vol. 31, pp. 76–86, 2016.
- [31] 강민호, "(A) study on improvement of navigation performance of land vehicle using low cost 2D DGPS/INS/Magnetometer considering gravity / 강민호," 중력을 고려한 저가형 2D DGPS/INS/Magnetometer 결합 차량 항법 측위 성능 향상에 관한 연구, 서울 : 서울대학교 대학원, 서울, 2017.
- [32] Z. Li, G. Chang, J. Gao, J. Wang, and A. Hernandez, "GPS/UWB/MEMS-IMU tightly coupled navigation with improved robust Kalman filter," *Advances in Space Research*, vol. 58, pp. 2424–2434, 2016.
- [33] C. Kee, H. Jun, and D. Yun, "Indoor Navigation System using Asynchronous Pseudolites," *The Journal of Navigation*, vol. 56, pp. 443–455, 2003.
- [34] S. Du and Y. Gao, "Inertial aided cycle slip detection and identification for integrated PPP GPS and INS," *Sensors (Basel)*, vol. 12, pp. 14344–62, Oct 25 2012.

- [35] Y. Song, B. Xian, Y. Zhang, X. Jiang, and X. Zhang, "Towards autonomous control of quadrotor unmanned aerial vehicles in a GPS-denied urban area via laser ranger finder," *Optik – International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 126, pp. 3877–3882, 2015.
- [36] Y. Kim, W. Jung, and H. Bang, "Visual Target Tracking and Relative Navigation for Unmanned Aerial Vehicles in a GPS-Denied Environment," *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, vol. 15, pp. 258–266, 2014.
- [37] Kim, Y., Song, J., Yun, H., Park, B., Kee, C., "GPS Cycle-slip Detection with Low-cost IMU and Single-frequency Receiver of Land Vehicle," *Proceedings of the ION 2013 Pacific PNT Meeting*, Honolulu, Hawaii, pp. 1032–1039, April 2013.
- [38] Y. Gao and J. F. McLellan, "An analysis of GPS positioning accuracy and reliability with dual-frequency data," in *ION GPS-96*, pp. 945–951, 1996.
- [39] S. P. Mertikas and C. Rizos, "On-line detection of abrupt changes in the carrier-phase measurements of GPS," *Journal of Geodesy*, vol. 71, pp. 469–482, 1997.
- [40] A. Lipp and X. Gu, "Cycle-slip detection and repair in integrated navigation systems," in *Position Location and Navigation Symposium*, 1994., IEEE, 1994, pp. 681–688.

## Abstract

As GNSS navigation is activated, the need for navigation indoor where GNSS is disabled is also increasing. However, since there are many obstacles for navigation in indoor environments, there is no reliable indoor navigation system yet. Accordingly, various researches such as RFID, Wi-Fi, Visual sensor, IMU and pseudolite are currently underway to develop a seamless indoor navigation system.

Among them, there have been a research about indoor navigation performed by integrating a pseudolite carrier phase with high accuracy positioning, a low-cost IMU, and a magnetometer. In this case, however, there was a limitation in the navigation because of the cycle slip problem of the carrier phase. There have been another research about detecting and compensating cycle slips by integrating GPS and IMU. However, this is a research conducted in outdoor environments and this research can detect slips in units of only 1 cycle. Since high occurrence rate of cycle slips in indoor environments increases occurrence of half cycle slips also, the research cannot apply to the indoor navigation as it is.

In this study, we solve the above two problems by the

following methods. First, this study tried to solve the cycle slip problem that remains in the pseudolite system by detecting and compensating cycle slips through the integration of the pseudolite and the ultra low-cost IMU. Second, since half cycle slips also occur frequently in indoor environments, this study tried to detect and compensate cycle slips in the half cycle unit instead of the 1 cycle unit.

Recently, with the development of smartphone, the technical level and application range of tasks that smartphone can perform are increasing. Accordingly, the ultimate goal is to develop an indoor navigation system that can conduct all this work on the smartphone. As a part of the process, this study used the ultra low-cost IMU built in smartphone for pseudolite/IMU integration. In order to use this ultra low-cost IMU, this research performed sensor modeling and handled abnormal problems in data.

As a result, the pseudolite/ultra low-cost IMU integration navigation improved the position accuracy about 30% compared to the pseudolite only. In half cycle slip detection, when the threshold is set to 0.5 half cycle, the probability of false alarm and miss detection is about  $10^{-8}$ .

To confirm this result, this study performed real-time navigation using 'KOBUKI' robot and smartphone and confirmed

that the navigation and control can be maintained well with the detection and compensation even if the slips of the half cycle unit are randomly generated in real time.

**Keywords :** Indoor Navigation, Pseudolite, Ultra Low–Cost IMU, Pseudolite/IMU Integration, Extended Kalman Filter, Loosely Coupled, Half Cycle Slip Detection and Compensation, Monitoring Value, Smart Phone, Position Accuracy, Real–time Navigation, Sensor Modeling

**Student Number :** 2015–22730